小型風力発電機の設計因子と磁場解析

Design factor and magnetic field analysis of small sized generator

2004 年 2 月

高知工科大学　工学研究科　基盤工学専攻

知能機械システム工学コース

環境機械・材料強度研究室

1065088　　汀 祥 子

目次

第１章　序 章

1.1　研究の背景　3

1.2　研究目的　6

第２章　風 力 発 電

2.1　羽根の種類　7

2.2　発電原理の発電機の構造　11

第３章　コ ア レ ス 発 電 機 の 製 作

3.1　発電機の分解調査　14

3.2　アキシャルギャップ型小型風力発電機の設計と製作　18

3.3　Rapid Prototyping による発電機の試作　22

第４章　Φ450mm 発 電 機 の 風 洞 実 験 に よ る 能 力 調 査 と 動 磁 場 解 析

4.1　風洞実験の目的　24

4.2　実験項目及び実験方法　24

4.3　静特性試験　25

4.4　負荷時における起動特性試験　26

4.5　動磁場解析の目的　28

4.6　解析ソフトと動作環境　28

4.7　Φ450mm 風力発電機の動磁場解析　30

4.7.1　仕様　30

4.7.2　モデル化　31

4.7.3　解析結果　31

第５章　　動磁場解析を用いた発電性能に及ぼす設計因子
5.1　概要　34
5.2　コア有り発電機の解析(A，B，C)　34
5.2.1　仕様　34
5.2.2　モデル化　35
5.2.3　解析結果　35
5.3　コア有り発電機の解析(D，E，F)　39
5.3.1　仕様　39
5.3.2　モデル化　40
5.3.3　解析結果　40
5.4　コア有り発電機の考察　44
5.5　コアレスコイルによる磁石の厚さの影響に関する解析　44
5.5.1　仕様　45
5.5.2　モデル化　45
5.5.3　解析結果　45
5.6　コアレス発電機の磁石数，コイル数の変更による解析　46
5.6.1　仕様　47
5.6.2　モデル化　47
5.6.3　解析結果　48

第６章　　結 章
6.1　結果，及び考察　49
6.2　風力発電に関する結論　49

謝辞　51

参考文献　52

第１章　　序 章

1.1　研究の背景

近年，地球環境に関する問題は日々増長している．その中，二酸化炭素の排出による環境問題は地球温暖化等の面から人々の関心を多く集めており，個人から起業，国までといった形で二酸化炭素の排出削減に膨大な力を注いでいる．

また、エネルギーは人々の生活と切り離すことのできないものになり，過去に化石燃料を主流としたエネルギーが生産に使われてきたことから，二酸化炭素の排出と共に化石燃料の多量消費となり，燃料が激減してきた．これらのことから，自然の力を動力とし，また二酸化炭素を排出することの無い新エネルギーは，化石燃料の消費面，二酸化炭素の排出削減の面から大きな注目を集めている．新エネルギーの種類として太陽エネルギー，風力エネルギー，水力エネルギー，地熱エネルギー等がある．

・太陽エネルギー：太陽光発電，太陽熱によるエネルギーの２種類がある．両者とも光，熱を得るためにパネルを屋根等に設置する必要がある．
日本の設置容量は 2001 年では世界１位となった

・風力エネルギー：風の持つエネルギーを利用し主に羽根を回転させることで発電機を使い発電する．詳しくは第２章で述べることとする

・水力エネルギー：高い場所から低い場所に落ちる水の落下のエネルギー，あるいは川の流れを利用し，水車を回し発電機を回転し電気を得る

・地熱エネルギー：火山や天然の噴気孔，地中深くから得られた熱(マグマ等)を利用してタービンを直接回し，発電する

その中で風力発電機は諸外国では以前から注目されていたが，近年では日本でも高い関心を集めている．

日本における風力発電機の当初の設置容量は 2010 年で 32 万 kWを目標に掲げていた．しかし、実際には 2002 年で 320,000kW を到達したため，2010 年での設置容量の目標値は 3000,000kW と上げられた. 風力発電機の設置容量はこの後も著しい向上を遂げ, 2003 年次では約 560,000kW の設置容量となった.（表 1）設置容量は北海道が約 160,000kW と国内で一番高い値を記録している．また，北海道の次に青森県が約 120,000 kW となっている．高知県では 2001 年の段階で設置容量は約 3,500kW であったのが 2002 年の

4,000kW となっており大豊町，野市町，椿原町は積極的に風力発電機の導入に取り組んでいる．（表 2）

これほどまでに風力発電機が近年，著しく普及した背景として 500kW 未満の発電設備に対する規制が 1990 年に緩和されたのが大きな要因となっている．規制の主な改正点は２つある．

・電気主任技術者の選任が不要になり，電気保安協会などへの委託だけで済ませられるようになった

・風力発電機の設置にあたって通産大臣の認可が必要であったのを改め，届け出制にしたこと．太陽電池では 100ｋW未満を，風力発電機では 5ｋW未満を届け出不要

この２つの改正点により，大企業だけでなくても一般の中小企業でも発電設備を設置できるようになり，風力発電機はさまざまなサイズの物，大型発電機から小型発電機までが普及するようになった．[1)]

表1　日本における風力発電システム導入量の推移

年	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
基数	6	7	20	29	36	50	61	75	115	177	251
設備容量 (kW)	798	898	2,639	4,439	5,330	8,987	12,260.5	16,063.5	30,933.5	69,683.5	136,508.5

注）基数、設備容量は年末の値。

出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構資料

著作権者：新エネルギー・産業技術総合開発機構

表2　日本における導入事例（高知県のみ抜粋）

設置年月日	設置者	設置場所	定格出力	台数	総出力	メーカー名	用途
1994年9月	四国電力(株)	高知県室戸市室戸岬	300	1	300	三菱重工業	実証試験
1995年3月	高知県企業局	高知県野市町	250	1	250	MICON	売電事業
1999年3月	高知県企業局（大豊風力発電所）	高知県長岡郡大豊町	600	2	1,200	LAGERWEY	売電事業
1999年11月	高知県檮原町	高知県檮原町	600	2	1,200	NEG MICON	売電事業
1999年12月	山田カントリークラブ	高知県土佐山田町	225	1	225	VESTAS	自家用

出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構

著作権者：新エネルギー・産業技術総合開発機構

1.2　研究の目的

過去に高知県の企業との共同により低風速で高トルクが得られるサボニウス羽根と組み合わせる事を前提とした小型の風力発電機の開発をした．その後、開発された小型風力発電機の性能を風洞実験により発電機の性能調査を行った．この実験結果を基に更なる発電能力の向上を目指すことにした．

本研究では，風の向きに関係なく低風速から回り始める事のできるサボニウス羽根と高知県の企業と共同で製作された風力発電機を組み合わせることを前提に，低回転からでも効率よく発電できる発電機の開発を目標とした．また，発電機内部の設計因子を変えることによって発電機の発電能力に及ぼす影響を調査することでより発電能力が向上できるような発電機内部の構造の最適設計を動磁場解析の結果を参考に用いて見出すことにした．

第２章　　風力発電

2.1　羽根の種類

風力発電機と言えば，大型で３枚羽根のプロペラ型の発電機を想像する人が多い．実際に，メディアで目にする風力発電機の羽根もプロペラ型の物が多い．しかし，発電機の羽根にはプロペラ型の羽根以外にも多くの種類がある．そこで，簡単に羽根の種類を説明する．

風力発電機は大きく分けて水平軸風車と垂直軸風車に分けられる．それぞれの特徴は下記の通りである．

・水平軸風車

１）車の回転軸が地面に対して水平になるタイプ

利点として

１）プロペラ型風車は飛行機のプロペラの研究成果やノウハウの蓄積から技術的にも進んだ段階にある

欠点・問題点としては

１）風車の回転面を常に風向きに合わせる必要がある．

２）発電機，伝達機構，制御機構などの重量物を支持塔の上部に設置しなければならない

・垂直軸風車

１）回転軸が地面に対して垂直になっているタイプ

利点として

１）どの方向からの風でも利用できる風向きに依存しない点

２）プロペラ型風車と同様な効率が得られる点

３）重量物を地上に設置できる点

４）ブレードの製造がプロペラ型と比較して簡単

欠点・問題点としては

１）低風速では回転を始めるのが困難である

２）回転数制御にも困難を伴う

水平軸風車と垂直軸風車は図 2.1 に示すように各種それぞれが存在する.

① オランダ形風車:羽根は木製の骨組に帆を張ったもので, 動力の調整は帆布を張る面積の増減により行う．風の持つエネルギーの 20%程度を取り出すことができる
② 多翼形風車:回転数は低いが機動力が大きいため低風速でも回転を開始する. 風の持つエネルギーの 30%程度を取り出すことができる
③ プロペラ型風車:動力の調整は風の流入方向に対して羽根の角度を変化, つまりピッチ制御によるものが多い. 風の待つエネルギーの最大 45%程度を取り出すことができる.
④ セイルウィング風車:風がいつも一定した海陸風を利用するため, ロータは風向きに応じて回転することなく固定されたものが多い.
⑤ パドル形風車:風が羽根の凹側を押す抗力と凸側を押す抗力の相違を利用して回る．半球型の羽根の場合，凹側の受風部で得られる抗力は凸側のおよそ４倍になる．風の持つエネルギーを取り出せる効率は 10%以下である
⑥ S 形ロータ：風車の半円筒形受風部の凹側の抗力は凸側のおよそ２倍になる．風車の持つ風のエネルギーの 10%しか取り出せない.

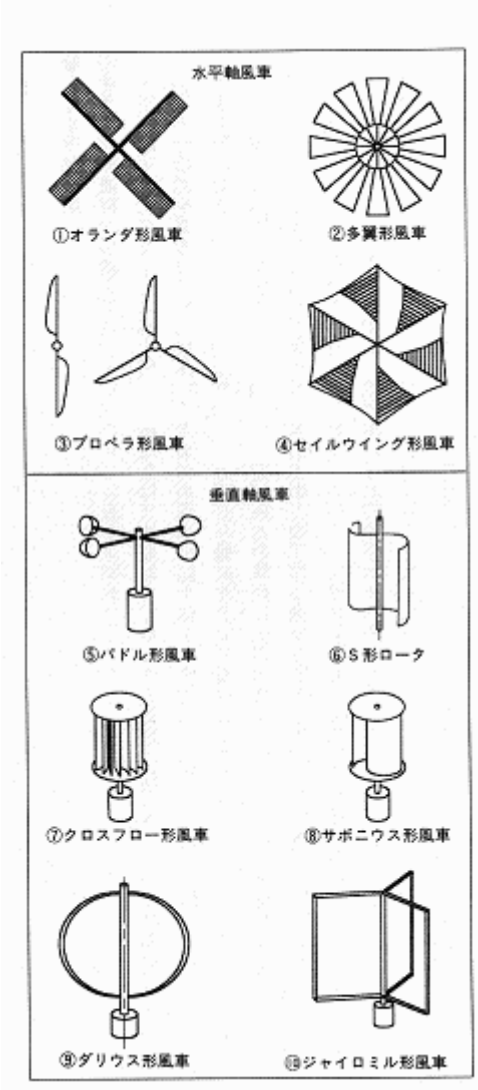


図 2.1　風車の種類

⑦ クロスフロー形風車：回転数は低くきわめて静かに回転する．風速の 1/3 くらいの週速度で回りながら, 風から最大のエネルギーを取り出せるが，それでも最大で風のもつエネルギーの 15%程度しか取り出すことができない.

⑧ サボニウス形風車：回転力は大きいが回転数は低く，風速と同じぐらいの週速度で回って，風の持つエネルギーを最大 15~20%程度を取り出すことができる.

⑨ ダリウス形風車：回転時に遠心力による曲げ変形がブレードに生じることなく，遠心力で引っ張られる力を取り出すことができる．性能的にはプロペラ形に近い. 風の持つエネルギーの 35%程度を取り出すことができる.

⑩ ジャイロミル形風車：揚力利用の垂直軸風車の一種で，回転軸を中心とする同心円上に，対称翼型の直線ブレードを 2～4 枚垂直に取り付けた構造で，風向きに対し常に最適な角度で風を受けられるようになっている．風の持つエネルギーの 40%程度を取り出すことができる.

風力発電を行う場合に理想とされる羽根は，風の持つエネルギーを最大限に利用して機械的エネルギーに返還できる羽根である．しかし，実際に使用されている羽根は，風の持つエネルギーを全て利用することができない．例えば，風力発電では風のエネルギーを 100%とするとロータによる空気力学的損失が約 60%, 増速機による機械的損失は約 4%，発電機による電気機械的損失は約 6%で正味の電気エネルギーとして得られるエネルギーは 30%程度となってしまう.

しかし，全ての羽根がそうでなく羽根は形状によって，風の持つエネルギーを取り出せる係数が異なる. 風速によって羽根が取り出せるエネルギーを表した図 2.2 より低風速ではサボニウス形風車，高風速では 2 枚羽根のプロペラ形，ダリウス形の風車が適していることが分かる．また、回転に必要なトルク係数に関するグラフを図 2.3 に示す.

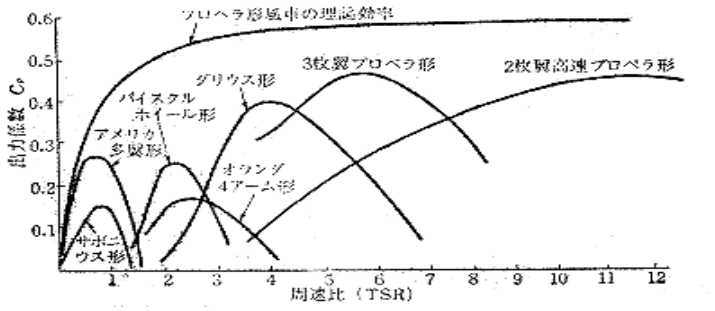


図 2.2　各種風車のパワー係数

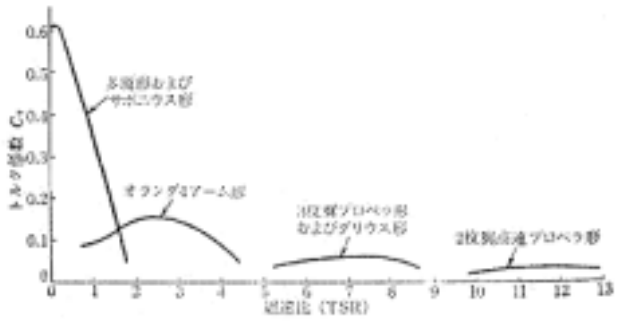


図 2.3　各種風車のトルク係数

風車を制作する場合，発電機の性能だけでなく風車から得られるエネルギーを見積もる必要がある．風車での風エネルギー変換後のエネルギーを以下に示すような式，また図 2.2 と図 2.3 のパワー係数，トルク係数を用いる事で求める事ができる．

$$\mathrm{P} = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3$$

$$\mathrm{T} = C_T \frac{1}{2} \rho A R v^2$$

$$\lambda = \frac{2\pi f R}{v}$$

ここで,

P ：風車出力 [W]

T ：風車トルク [N・m]

λ ：周速比

C_p ：パワー係数

C_T ：トルク係数

f ：風車回転数 [rps]

ρ ：空気密度 [kg/m^3] (空気の場合 1.2 kg/m^3)

A ：受風面積 [m^2] (風車の羽根の 幅×高さ)

R ：風車半径 [m]

v ：風速 [m/s]

2.2　発電原理と発電機の構造

始めに発電の原理について示す.

電磁誘導には,『運動起電力』と『誘導起電力』がある．図 2.4 のように導体が磁場の中を動くと導体中に誘導される起電力が発生する．これを運動起電力といい，この時の起電力V は,

$$V = \nu B\lambda$$

V ：起電力

ν ：速度 [m/s]

B ：磁束密度 [T]

λ：磁界中の導体の長さ [m]

で表される.

図 2.5 は誘導起電力を表し，誘導起電力は時速の時間変化によって起きる．コイルでの誘導起電力に置き換えて考えると,

$$V = -N\frac{d\phi}{dt}$$

(－の符号は誘導される起電力が磁束の変化を妨げる方向に生ずる事を現す)

V ：起電力

N ：コイルの巻数

ϕ ：磁束 [Wb]

t ：時間(秒) [s]

で表すことができる.

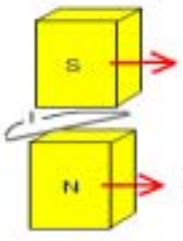


図 2.4　誘導起電力

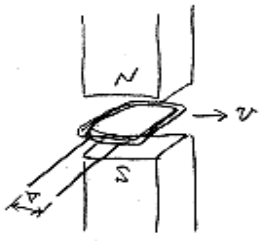


図 2.5　運動起電力

発電機には，アウターロータ型発電機とインナーロータ型がある.

インナーロータ型は，磁石をロータ(回転子)にして内側に配置して，巻線をステータ(固定子)にして外側に配置したものである.

アウターロータ型は，内側にコイル，外側に磁石を配置して，外側を回転させるものである．アウターロータ型はインナーロータ型に比べ，回転軸の慣性モーメントが大きいが，磁石を小型化する必要がなくコイルを巻くにも有利な構造である.

磁束密度と磁界強度はオームの法則のようにほぼ比例しており

$$B = \mu H$$

B ：磁束密度 [T]

H ：磁界強度 [A/m]

μ ：透磁率 [H/m]

となる．この比例定数 μ の事を，透磁率と呼ぶ．この透磁率の値が高いほど，磁束を通しやすいわけである．発電機は一般的にヨーク(鉄)にコイルを巻いて作られている．これは，空気よりも鉄の方が磁束をよく通すためである．透磁率が空気は μ =1 であるのに対し，鉄は約 μ =1000 であるとされ磁界の大きさは同じであるが，磁束は 1000 倍となる．B と H の関係を表したものが B-H 曲線(磁化曲線), 図 2.6 である．これは軟磁性体の B-H の関係である．

磁化されていない鉄を磁界中に置き，磁界の大きさを変化させていくと残留磁気と言うのが発生する．このため，モータなどを回転させるとき抵抗を感じ，回転に力を必要とする．これがコギングトルクとなる．そのため，鉄を使ったモータや発電機は様々な形式でコギングトルク対策を行っている．

また，導体上で磁石を動かすと導体全体として電流は流れないが，磁石が通過して磁束の変化のあった狭い範囲で起電力が発生し, その前方と後方で起電力の向きが逆になるので電流のループを作る．これが図 2.7 の渦電流である．動かす磁石の速度が速いほど磁束の単位時間変化が大きくなるため，渦電流は大きくなる．

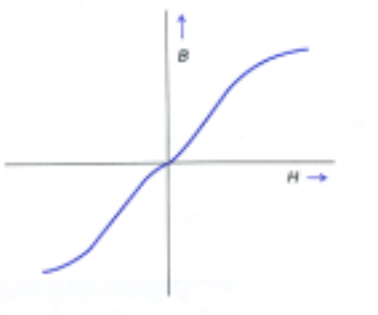


図 2.6　B‐H 曲線

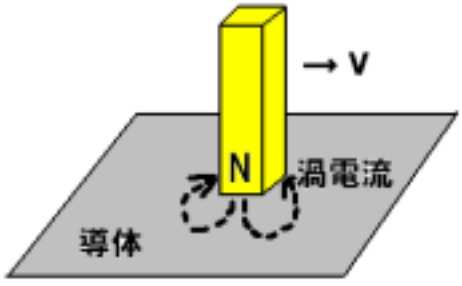
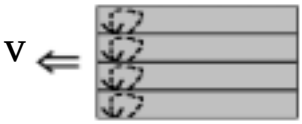


図 2.7　渦電流

磁石と磁性体が引き合う以外にも，この渦電流もコギングトルクの原因となっている．そこで，この現象を低減させる方法の一つとしてケイ素鋼板などを図 2.8(b)のように積層して鉄心とすることが一般的に使われている．これは，図 2.8(a)の 1 枚の鋼板の場合と違い，渦電流の発生方向の厚みを薄くすることによって渦電流の作るループを極力小さくする働きによるものである．

(a)一枚銅板の場合



(b)積層鋼板の場合

図 2.8　積層鋼板

第 3 章　コアレス発電機の製作

3.1　発電機の分解調査

発電機の内部構造については，内野喬誌（高知工科大学知能機械システムコース 2002 年度 修士終了）が 5 タイプの発電機，Southwest Windpower 社製 Air403（アメリカ），Marlec 社製 Windcharger WG910（イギリス），三洋電機製 自転車用 HUB DYNAMO（日本），小型水力発電機 AquaU.W.（アメリカ），新日本技研製 SNK1000（日本）について分解調査を行った結果が表 3 である．

分解調査として磁石枚数，コイル数，出力波形，磁石形状，コギングトルク対策の項目を取り上げた．

下記にそれぞれの発電機について記す．

・ Southwest Windpower 社製 Air403（アメリカ）

長さ 56cm の羽根 3 枚で回転を行う．

風速 3.0m/s から発電を開始し，定格出力は風速 12.5m/s の時に 400W を出力する．3 相ブラシレス永久磁石オルタネータを使用しており，内部で出力を DC（直流）電流に整流する．（図 3.1）

ブレード（羽根）は強風時のオーバースピードを防ぐ働きを持ち，非常に弾力性があることを特徴として，風速 21.5m/s 以上の強風の中ではブレードの先端が風の力によってねじれ，余分な力を逃がす働きとなっている．

図 3.1　Southwest Windpower 社製 Air403

・ Marlec 社製 Windcharger WG910（イギリス）

比較的低風速での発電を意識したコンセプトと思われ，6 枚のプロペラが発電機ハウジングの外周に直接付けられている．

図 3.2　Marlec 社製 Windcharger WG910

本研究で分解調査を行ったものは，発電機のフェライト磁石を住友特殊金属 NEOMAX44H にしたものである．（図 3.2）

・ 三洋電機製 自転車用 HUB DYNAMO（日本）

自転車前輪のハブに内蔵されるもので，低回転から実用的な発電を得る事ができると期待できる．

ステーターとなるコイルを巻いた物の外形は直径 69.70mm でローターとなる磁石はハウジング内部の外周に 1 枚あたり 8 極に着磁された磁石が 4 枚並べて貼り付けられている．

発電機自体の性能は 6.0V，2.4W である．（図 3.3）

図 3.3 三洋電機 自転車用 HUB

・小型水力発電機 AquaU.W.（アメリカ）

羽根は 3 枚の軽量アルミ合金のプロペラとなっており，プロペラ直径は 318mm である．2 基の発電機から交流出力を取り出し，それを 2 つのダイオードブリッジで整流後，最終的に直流，並列として出力する．

磁石，コイルは 2 段になっており，ステーターは図 3.4 の右図は磁石，ローターは左図のコイルである．図 3.4 の右図より磁石は上と下で 34～35 度ずらして配置されている．このずれは，コイルには見られなかった．

発電開始流速は流速 1.8m/s であり，流速 4.0m/s 時で約 100W の出力が得られる．納田慎也（高知工科大学知能機械システム工学科 2003 年度 卒業予定）が高知県

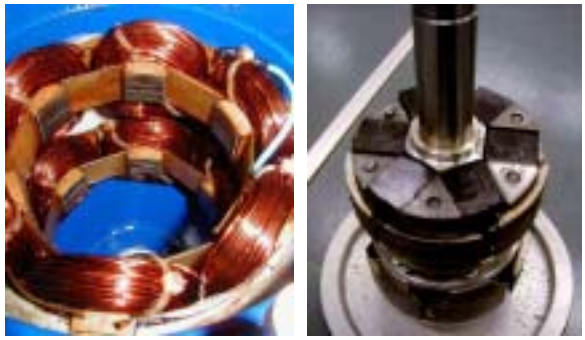
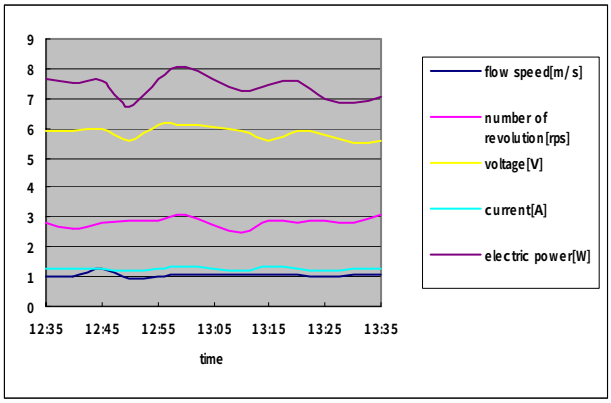


図 3.4 小型水力発電機 AquaU.W.



グラフ 3.1 AquaU.W.による実験

香美郡野市町の用水路で行った実験では，グラフ 3.1 のような結果を得た．用水路の流速が平均 1.2m/s であり，その流速に対する平均電力は平均 7.6W である．

・ 新日本技研製 SNK1000（日本）

長さ 1.3m の羽根 3 枚で回転させ，定格出力 1000W を出力する．

この発電機のローターは磁石，ハウジングでステーターはコイルとなっている．発電開始の風速は風速 2.0m/s で，発電効率に優れているとされる風速は 3～5m/s とされている．磁石とコイルの相数は 8 極，AC3 相となっており，発電効率は 80%以上となっている．磁石は，ローターの内側に付着している．図 3.5 の後ろの配線を集中させている物は整流器である．

コイルは前後についており 9 つのコイルからなっている．図 3.5 のコイルを上から撮影したものから，前後のコイルは微妙に位相がありずれを伴っている．

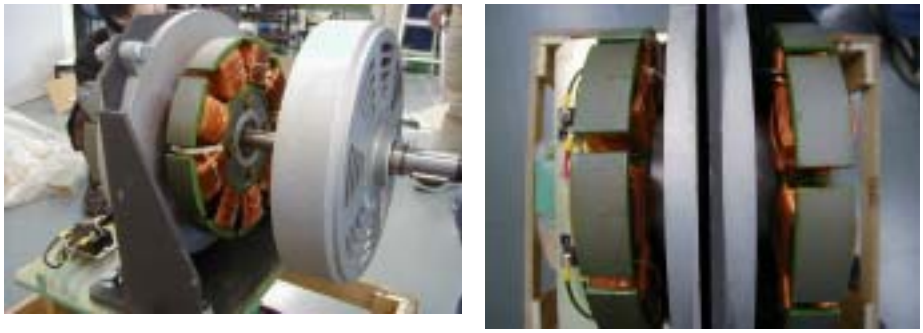


図 3.5　新日本技研製 SNK1000

表３　市販発電機の分解調査

メーカーと機種名	出力	コイル巻き方	コイルコア	出力波形	磁石	コギングトルク対策
Southwest Windpower 社製 Air403	400W	分布巻き 36 コイル	コアあり	3 相	コイル内側に 12 極	磁石が蒲鉾状
Marlec 社製　Windcharger WG910	300W	集中巻き 8 コイル	コアレス	単相	コイル両側に 8 極ずつ	
三洋電機製 自転車用ハブダイナモ	2.4W	集中巻き 1 コイル	コアあり	単相	コイル外側に 32 極	
Aqua U.W.	100W	集中巻き 6 コイル×2 列	コアあり		コイル内側に 6 極	
新日本技研製　1kw 発電機	1000W	集中巻き 9 コイル×2 列	コアあり	3 相	コイル外側に 8 極	スロット･磁極の組み合わせ 鉄心両端部をカット

分解調査より，以下のことが分かった．

・ コアがある発電機では何らかのコギングトルク対策を行っている
・ 磁石の力を大きくするために永久磁石を使用している
・ 交流出力を直流出力に変換している
・ 磁石数，コイル数，磁石とコイルの数の比，及びコイルの巻き方には一貫性がない

3.2 アキシャルギャップ型小型風力発電機の設計と製作

大型の風力発電は騒音が問題となっており，また設置場所には広い土地が必要となり，日本の国土は他の諸外国に比べて狭いので多くの大型の風力発電を設置するのが困難とされる．しかし，小型の風力発電は広い土地を必要する事がなく，騒音もほとんど無い．また，モニュメントタイプとして使用でき，大きな企業だけでなく小さな町工場でも制作ができることから多くの注目を浴びている．

風力発電で多く目にするのは 3 枚羽根のプロペラ型である．しかし，日本の風は，風向きの変化が激しく，安定した一定の風を得ることが困難とされている．そこで，低回転で高トルクが得られ，風向きに関係なく回転することのできるサボニウス型風車と組み合わせることができ，低風速からでも発電効率の良いコアレスの風力発電機の開発を行った．

発電機の開発における設計指針は下記に示す．

① 周速度を稼ぐために，大外径化
② コイル数，磁石数をできるだけ多く配置
③ 構造が比較的簡単とされるアキシャルギャップ型(磁石対向型)
④ 強力な磁力が得られる希土類永久磁石の配置
⑤ コギングトルクを失くすためにコアレスコイル
⑥ 電圧を整流した際，比較的平均電圧が高く，効率よく電力が取り出せるように磁石とコイルの比を 4：3

これらの設計指針を基として，高知工科大学，坂本技研，スカイ電子でΦ450mm 風力発電機の設計制作を行った．

図 3.7 は 3 次元 CAD ソフト，Solid Designer 9.1 を用いて描いたΦ450mm 風力発電機の全体モデルである．緑色のモデルはハウジング，続いて内側の黄色はバックヨーク，赤色は磁石，青色はコイル，中心に見える灰色はシャフトである．ハウジングは発電機の内部を覆うカバー的役目を果たしている．磁石だけだと磁力線が自分自身のＮ極からＳ極へ，または隣り合う磁石へと回ってしまいコイルにうまく垂直に貫通しない．そのためバックヨークを置くことにより、対向磁石と反対側（コイルの無い方）に出た磁力線が発散せずにバックヨークを通って隣の磁石に向かっていくため、磁力線の漏れを小

さくすることができる．バックヨークで隣り合う磁石が１つの『コ』の字型の磁石になったようなイメージである．

図 3.8 は実際に作られたΦ450mm 風力発電機である．また，図 3.6 は高知高専の屋上に設置されたΦ450mm 風力発電機を使った風力発電でデータの観測に用いられている．Φ450mm 風力発電機は，発電機の回転数 300rpm で 1000W を目標として製作された．

コイルをシャフトと固定させるために樹脂を用いた．図 3.9 のコイルに付着している白い物が樹脂である．コイル内部にコアを入れておらず，コアレスコイルとなっている．また、コイルの結線方法については，集中巻とし 2 つずつ飛ばしの結線方法で，3 相交流の出力波形となるようになっている．図 3.10 は磁石を写したものである．磁石には強力な磁力を得るために希土類永久磁石を起用している．効率よく電力が取り出せるように磁石とコイルの比を 4：3 とするため，Φ450mm 風力発電機では磁石 32 極，コイル 24 個としている．

図 3.6　Φ450mm 風力発電機
高知高専屋上

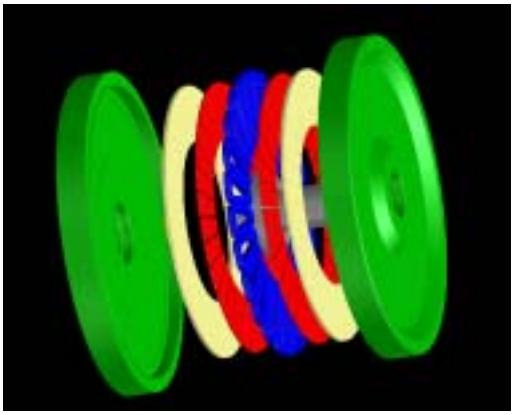


図 3.7　3 次元 CAD による発電機

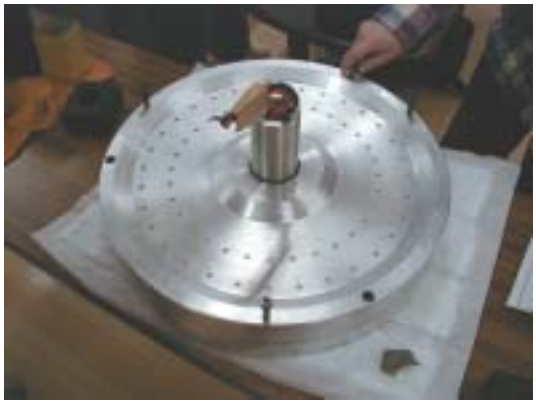


図 3.8　製作された発電

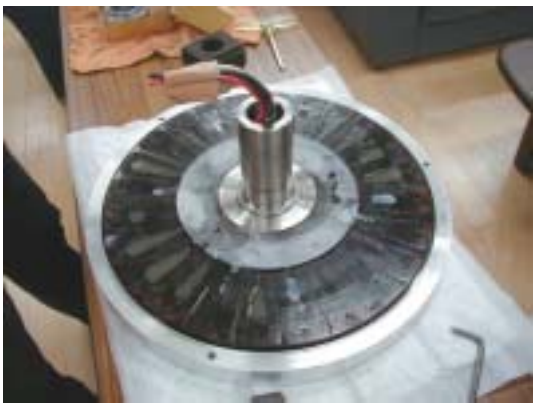


図 3.9　発電機 コイル

図 3.10　発電機 磁石部

Φ450mm 風力発電機と同様の設計指針で, 発電機の回転数 300rpm で約 100W を目標にさらに小さい図 3.13 のΦ250mm 風力発電機の製作も行った．この発電機は実際に市販されいているもので，高知県企業のエコエナジーが販売を行っている．図 3.11 は高知県椿原町に設置されている TWINKLE(Φ250mm 風力発電)である．TWINKLE は，風が吹かなくて発電が行えない場合を想定した上で，サボニウス羽根の上にソーラーパネルが取り付けられている．また，光源には色を自由に出すことができ球切れがなく，効率性の良い『LED 要素』を使用している．発電機により出力される電力は交流であり，それを直流に変換するために図 3.12 のような変換機が発電機の近くに設置されている．この，変換機のパネルには現在の風力，太陽光の発電量が表示され，現在の電圧も同時に表示されるようになっている．Φ250mm 風力発電機は, Φ450mm 風力発電機の軽量化を目的としたため，全体的に厚みは薄くなっている．図 3.13 がハウジングを写したものだが，試作の段階(図 3.14 左図)では, リブは取り付けられていなかった為，ハウジング部に発電時に放出される熱で音頭が上昇する．そのため，熱を逃がしやすくする為にハウジング部分に図 3.14 の右図のよう

図 3.11　Φ２５０mm 風力発電機
高知県椿原町

図 3.12　変換機

なリブが 12 個，取り付けられている．
図 3.15 では磁石とコイルを並べたものである．
対向する磁石間の距離がΦ450mm 風力発電機より短い事から，用いられた磁石はΦ450mm 風力発電機より磁力の弱い希土類永久磁石を使用している．コイルについてはコイルの一部を拡大したものが図 3.16 である．コイルとシャフトの取り付け部にはベークライトを用いる事で更なる軽量化が見られる．バックヨークに関しては CAD で描かれた図 3.17 のように，磁石がはめ込まれる部分に 1mm の溝を作る事で形状の変更が行われた．

コイルの結線方法についてはΦ450mm 風力発電機と同様である．また，磁石とコイルの比を 4：3 とするため，磁石 24 極，コイル 18 個としている．

コイルに使用されている導線の径は，Φ450mm 風力発電機ではΦ1.0mm，Φ250mm 風力発電機ではΦ0.8mm が使用されている．導線の径をさらに小さくすれば，コイルへの巻数をさらに増やす事ができる．しかし，発電が行われるときに導線が細いと熱が生じ，高回転時に導線が燃えてしまうのを避けるためである．

図 3.13　発電機外

図 3.14　ハウジング

図 3.15　磁石とコイル

図 3.16　コイル拡大

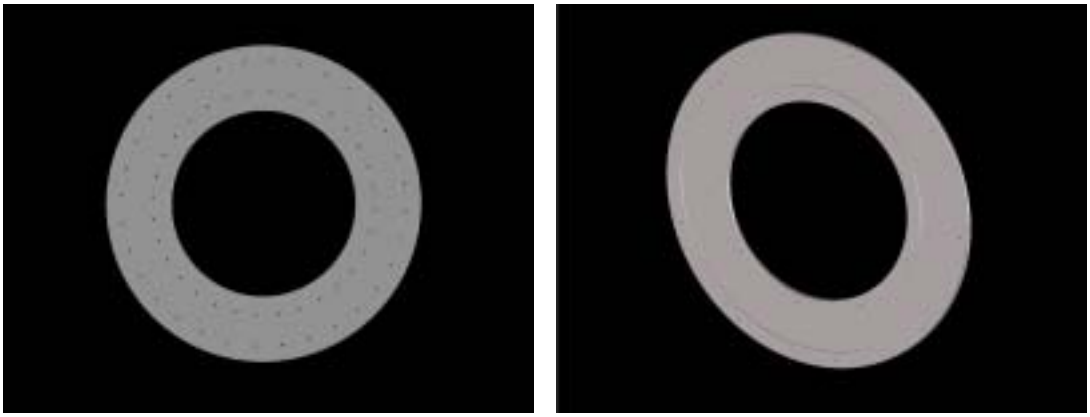


図 3.17　バックヨーク(左:Φ450mm 風力発電機, 右:Φ250mm 発電機)

3.3　Rapid Prototyping による発電機の試作

3 次元 CAD で描いたΦ450mm 風力発電機のモデルを Rapid Prototyping を使用して試作品を造ることにした. 図 3.18 が Rapid Prototyping 装置の Stratasys 社の『Genisys Xs』である．この装置は文書をプリンタで印刷する事と同じ感覚で CAD によって描かいた 3 次元モデルを迅速かつ安価で製作するものである．Genisys Xs の寸法は，幅 912mm(36 インチ)，高さ 812mm(32 インチ)，奥行き 787mm(31 インチ)である．

内部の主要部品は以下である．

- 304×203×203mm(12×8×8 in．)　プラテン(作成領域)
- コンピュータ制御のプリンタ・チップ
- 高性能 Pentium マイクロプロセッサ
- 最大 10 個の上は供給カセット

作成領域であるプラテンでは，304×203×203mm の大きさのパーツを造形する事ができる．コンピュータ制御のノズルは X 軸方向の移動に対し，プラテンは Y 軸と Z 軸方向への移動が可能となっている．

Rapid Prototyping でのモデルの制作方法として，まず CAD ソフトによって描かれたモデルを拡張子 STL にして保存し，Rapid Prototyping の専用ソフトで読み込む．その画面の中で製作されるモデルのサイズや製作に必要とされる時間などの計算が行われる．STL で保存を行う際，モデルの精度を上げると粗さの緩和が行え，より奇麗な試作品を製作することが行える．モデル製作には縦 51mm，横 19mm，厚み 4mm の図 3.19 のプラスチック・ポリエステルの板を熱で溶かし，ノズルから 0.3302mm ほどの細い材料となり押し出される．この材料により作り出されたのが図 3.20 と図 3.21 である．図 3.20 では磁石とバックヨークのアセンブリが行われたモデル，図 3.21 はハウジングである．これはΦ450mm 風力発電機の 25 分の 1 モデルである．このハウジングの作成に費やし

た時間は約 8 時間である．また，このプラスチック・ポリエステル板の 1 枚分の値段は約 400 円である．

また，作製モデルに空間が空く場合はサポートと呼ばれる補助となる形状が作製され，作られたモデルはこのサポートを人の手で取り除く事で完成する．

Rapid Prototyping 装置で製作されたモデルでは，部品同士の干渉チェックを行う際などに適している．

図 3.18　Rapid Prototyping

図 3.19　プラスチック・ポリエステ

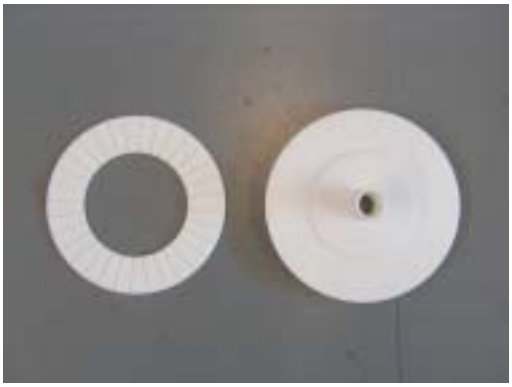


図 3.20　製作されたモデル(1)

図 3.21　製作されたモデル

第 4 章　Φ450mm 発電機の風洞実験による性能調査と動磁場解析

4.1　風洞実験の目的

高知県の企業等によって製作されたΦ450mm 発電機の性能調査を行うために，埼玉県の前田建設工業株式会社様所有のジャイロ型風車に組み合わせた風洞実験を行った．

4.2　実験項目及び実験方法

実験に使用した風洞は，測定洞断面積 4.3mm×3.0m，測定洞長さ 8.0m，風速範囲 0.5～8.0m/Sec である．この風洞の中に直径 1700mm，高さ 1700mm で 3 枚ブレードのジャイロ型風車を設置した．その時の状況が図 4.1 である．下の白い台の下に発電機が取り付けられている．この風車にプーリーで 3 種類(24 歯，36 歯，72 歯)の増速比が得られるようにした上で，ベルトで発電機を駆動している．

発電機から出された 3 相交流出力は，ダイオードブリッジを通すことで全波形整流された出力が出されるようになっている．電子負荷装置を用い，電圧計，整流計，デジタルワットメータで計測を行った．

測定を行った項目については下記の通りである．

- 静特性試験(無負荷時，負荷時)：抵抗を与えずに風洞内で風を発生させ，発電機の発電機回転数と発電電圧の関係を調査する
- 起動特性試験(加速性能試験，負荷あり)：発電機に外部抵抗を繋いだ状態で，風車の起動特性を調査する．
- 起動特性試験(加速性能試験，負荷あり，コイル 1 組のみ使用)：発電機のコイルを 1 組にのみ外部負荷を繋いだ状態で，風車の起動性の調査する．

これらの項目で，それぞれ増速比を変えて実験を行った．

図 4.1　前田建設所有ジャイロ型風

4.3　静特性試験

無負荷時(抵抗を与えない)における，増速比 1.5 倍時の発電回転数と電圧の関係を図 4.2 に示す．このときのコイルの結線方法は Y 結線である．また，⊿結線時のグラフは図 4.3 である．この二つのグラフを比較した場合，Y 結線時の方が電圧が高いことが分かる．

増速比を変更して実験を行ったところ, 増速比 1.5 倍より 3.0 倍の方が高い電圧が得られる事が分かった．これは，発電機がコアレスであり，かつ無負荷状態であることから，回転の妨げとなるコギングトルクがほとんど発生しないことが増速比を高くしても回転に大きな影響を及ぼさない事を表している．

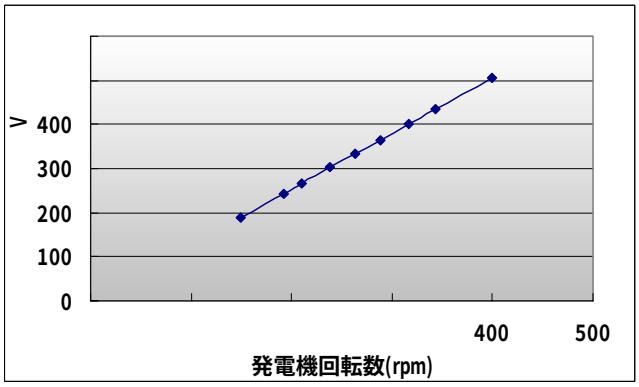


図 4.2　増速比 1.5 倍，Y 結線時の
発電圧と発電機回転数

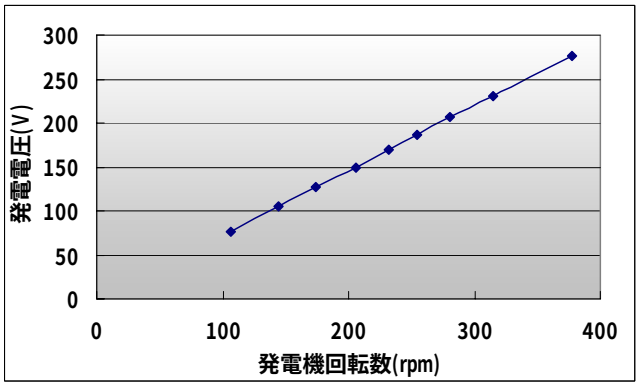


図 4.3　増速比 1.5 倍，⊿結線時の
発電圧と発電機回転数

また，この静特性試験で負荷を与えたときの電流，電圧，電力のそれぞれのグラフが図 4.4，図 4.5，図 4.6 である

負荷時において，増速比に関して増速比 1.5 倍の時より増速比 2.0 倍時の方が電圧，電力共に高くなった．電流に関しては，増速比 2.0 倍の方が増速比 1.5 倍に比べて高い値が得られる．

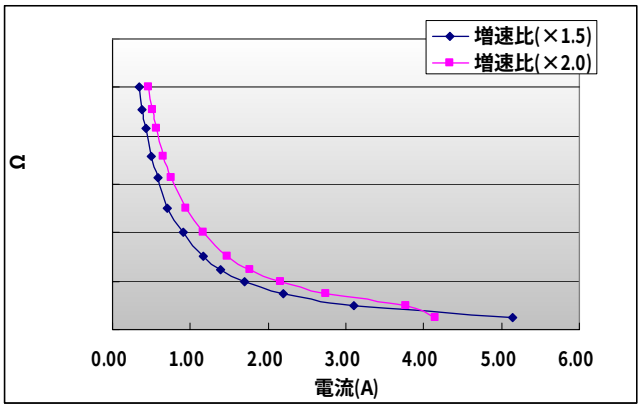


図 4.4　負荷時の抵抗と電流の関係

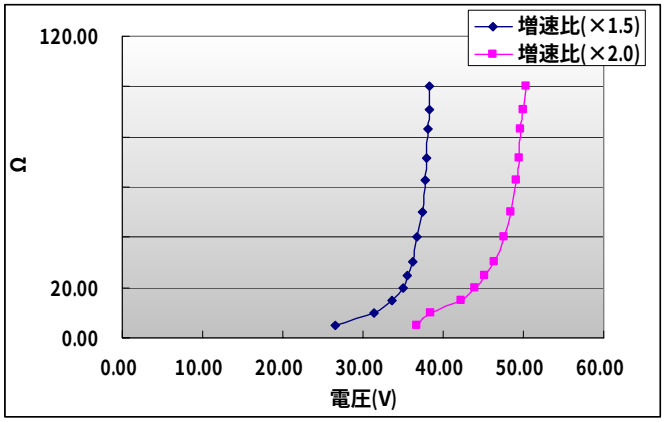


図 4.5　負荷時の抵抗と電圧の関係

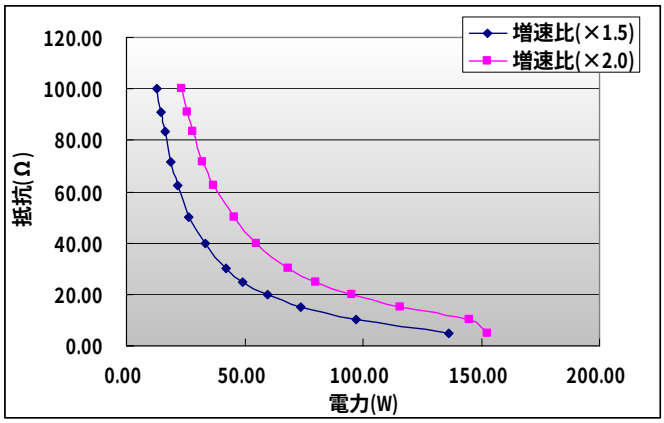


図 4.6　負荷時の抵抗と電力の関係

4.4　負荷時における起動特性試験

風車の加速するときの電圧，電流，電力をそれぞれ，抵抗を変化させて計測を行った．実験の方法は，風洞内の風速が安定するまで風車を手で止め，風速が安定した時点で風車から手を離し，また測定を同時に開始した．また，コイルについては，コイル 3 組(3 相)を結線した場合，コイル 1 組(単相)を用いた場合の計測を行った．

実験より，どの風速，負荷抵抗についてもコイル 1 組の方が発電機の回転数が高く起動特性が良かった．しかし，電力，電圧，電流共にコイル 3 組の方がコイル 1 組に比べて高い結果が得られた．

実験で得られた結果を図 4.7～図 4.12 に示す．全ての図において横軸は時間，縦軸には発電機回転数，電力，電圧，電流をとっている．

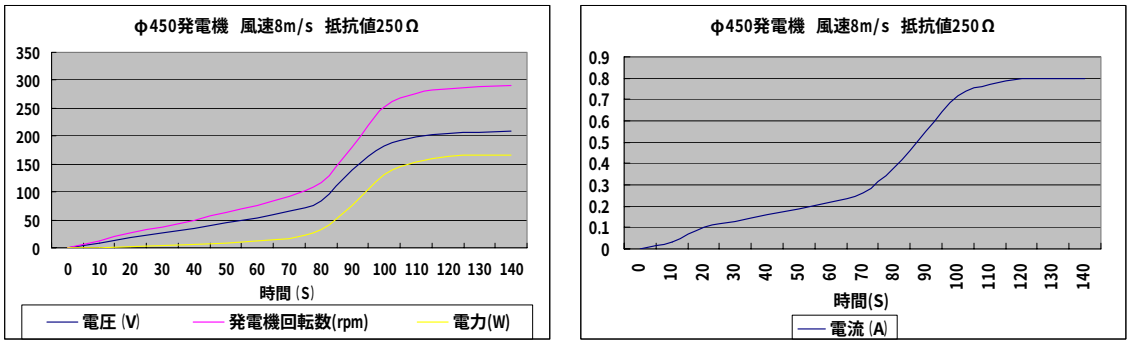


図 4.7　抵抗 250Ω　コイル 3 組の起動特性

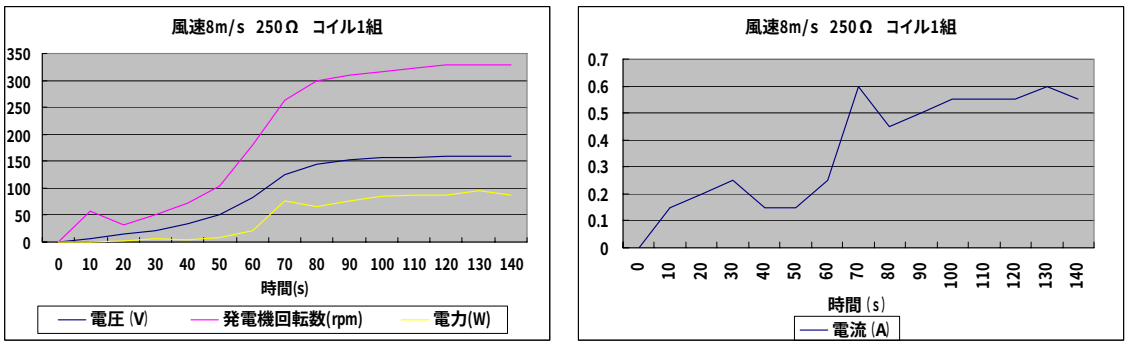


図 4.8　抵抗 250Ω　コイル 1 組の起動特性

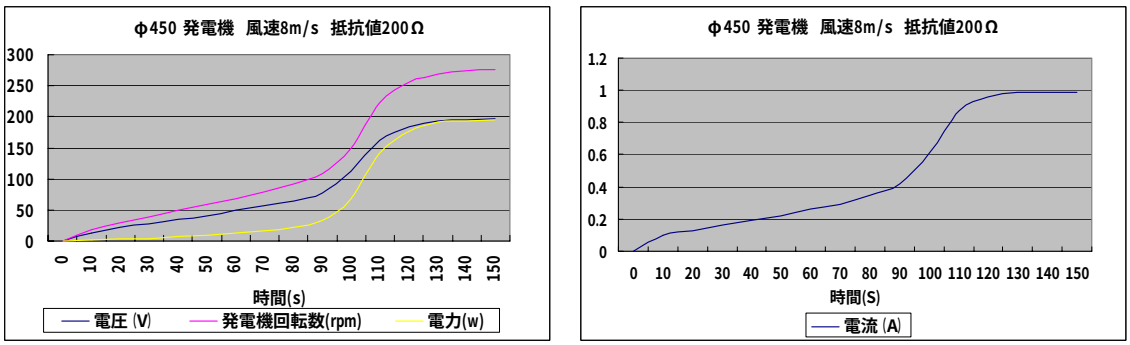


図 4.9　抵抗 200Ω　コイル 3 組の起動特性

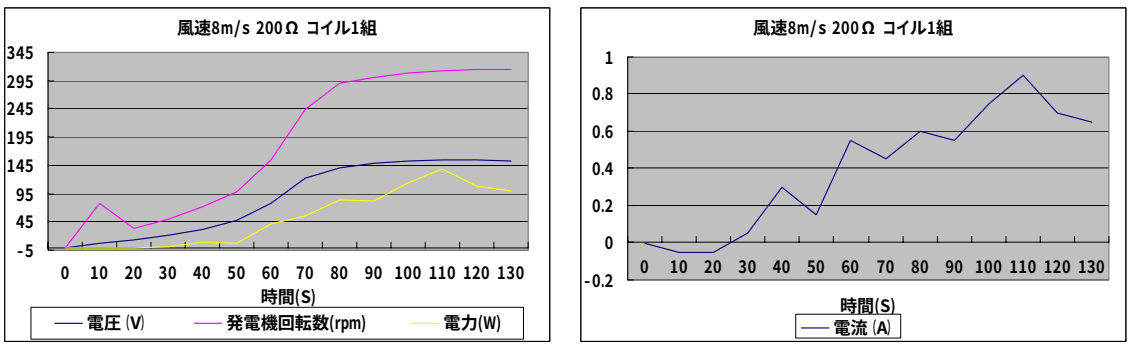


図 4.10　抵抗 200Ω　コイル 1 組の起動特性

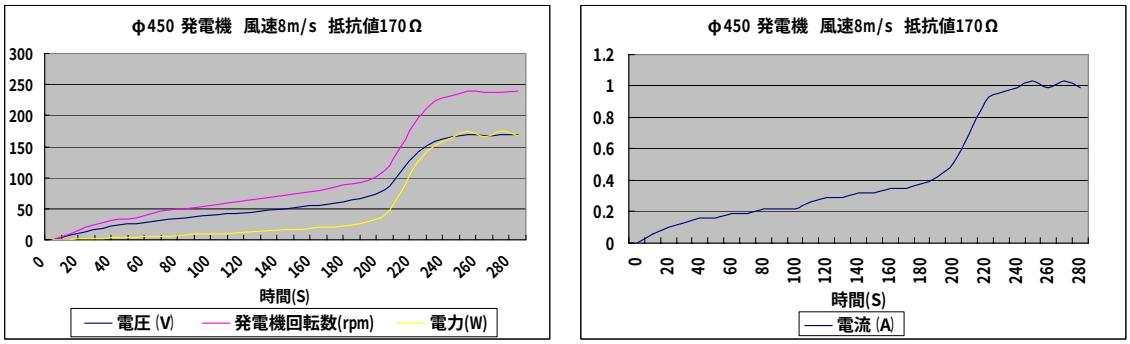


図 4.11　抵抗 170Ω　コイル 3 組の起動特性

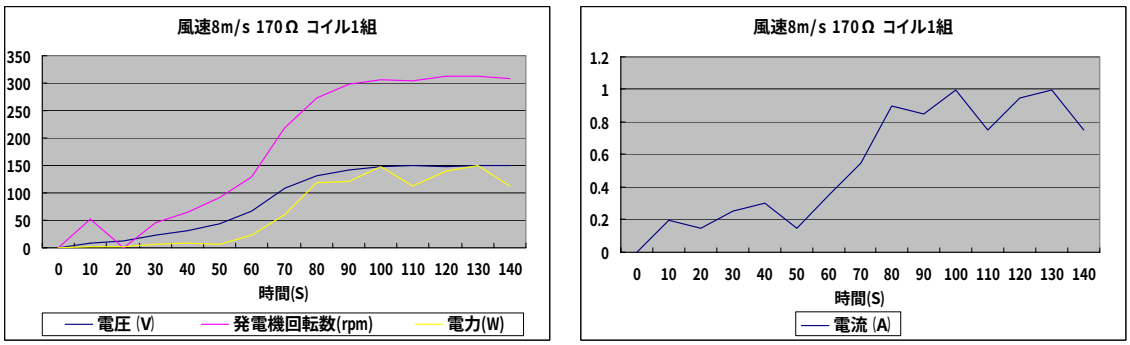


図 4.12　抵抗 170Ω　コイル 1 組の起動特性

4.5 動磁場解析の目的

発電機の性能は第 4 章のように風洞を用いた実験で計測を行うことができる. しかし, 発電機内部の磁場分布や磁束密度などは, 実際に器具を用いて実験を行うとなると多額なコストが必要となる.

そこで, 本研究では動磁場解析を用いて発電機内部の磁場分布、磁束密度の調査, また開放電圧(抵抗無限大時)を求めることとした.

4.6 解析ソフトと動作環境

動磁場解析に用いたソフトは株式会社エルフの ELF/MAGIC である. ELF/MAGIC は, 『積分要素法(IEM)』を用いた 3 次元非線形磁場解析プログラムである. これは, 表面磁化法磁気モーメント法を連携した手法である. また, 有限要素法などと異なり空間メッシュ・境界条件・ゲージ条件などを必要としない.

積分方程式を用いた手法について，ポテンシャルを積分で計算して変数の一次結合で表し，方程式を立てる．ELF シリーズでえ使われている主な式は次の通りである．[2)]

トルクに関する式では ELF/MAGIC ではマクスウェル応力式と真空中のマクスウェル応力の式が基本となっている．

マクスウェル応力式は下記である．

$$\vec{p} = \mu_0 H_n \vec{H} - \frac{\mu_0 H^2}{2}\vec{n}$$

真空中のマクスウェル応力式は

$$\vec{p} = \left(\vec{B}\cdot\vec{n}\right)\vec{H} - \frac{1}{2}\left(\vec{H}\cdot\vec{B}\right)\vec{n}$$

H_n ：磁場 H の法線成分
n ：放線方向の単位ベクトル
H ：磁界強度
μ ：比透磁率
B ：磁束密度

トルクを求めるのに ELF/MAGIC では，

$$\vec{F} = \sum S\vec{p}$$

$$\vec{T} = \sum \vec{r} \times S\vec{p}$$

$\sum$ ：ベクトルの和
S ：マクスウェル応力面要素の面積
r ：要素の中心点の位置ベクトル

誘導電流の計算方法としては電気回路についての関係式，誘導起電力についての関係式を変形した下記の式が ELF/MAGIC では使用されている．

$$I_{ind} = -\frac{N}{R}\cdot\frac{\sum_k \Delta\Phi_k}{\Delta t}$$

$$I = I_0 + I_{ind}$$

$$E = -R\cdot I_{ind}$$

I_{ind} ：誘導電流
N ：コイルの巻き数
R ：抵抗
Φ ：磁束量
t ：時間
I_0 ：強制電流
I ：コイル電流
E ：誘導起電力

プリポストプロセッサには FEMAP Ver8.2 を使用した．このソフトは有限要素モデリング/ポストプロセッシングシステムである．FEMAP 上でジオメトリの作成を行ったり，CAD のジオメトリデータをインポートする事などができる．

解析で使用したパソコンの CPU は Pentium4 2.80GHz，メモリー2GB を使用した．本研究で使用する解析モデルでは，解析日数は約 4 日である．

4.7 Φ450mm 風力発電機の動磁場解析

解析概要を下記に示す．

4.7.1 仕様

[解析対象] Φ450mm 発電機
(図 4.13，オレンジ色→コイル，黄色→磁石，灰色→バックヨーク)

[解析目的] Φ450mm 発電機の開放電圧の調査をする

[解析条件] ・ 三次元，非線形，動磁場解析
・ コイル結線は Y 結線
・ 鉄の B-H 曲線(図 4.14，縦軸：磁束密度 B(G)，横軸：磁場 H(Oe))
・ 磁石の磁石特性(図 4.15，縦軸：磁束密度 B(G)，横軸：減磁界-H(A/m))
・ 単位：m

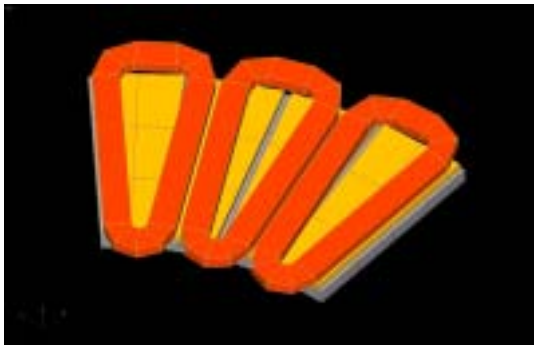


図 4.13　Φ450mm 発電機解析モデル

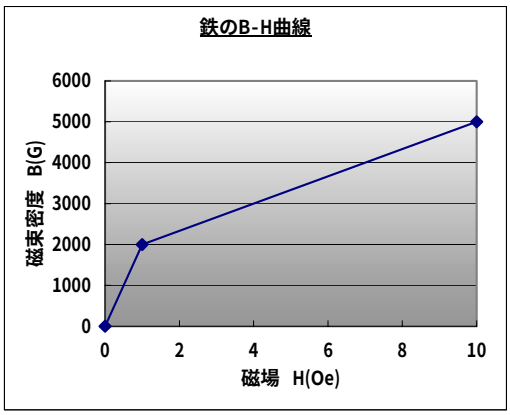


図 4.14　鉄の B-H 曲線

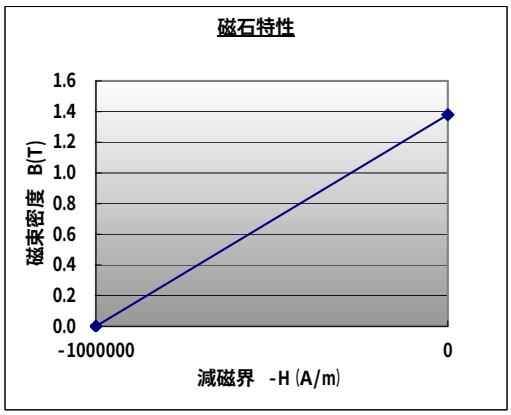


図 4.15　磁石特性

4.7.2 モデル化

- 軸方向に 1/2 モデル

  対象性から基準となるワークプレンを中心に下半分をモデル化する
- 半径方向に 1/8 モデル

  対象性から 45 ° のみをモデル化する
- 動磁場解析

  コイル一つ分を磁石とバックヨークが動くときの時間数を設定する

4.7.3 解析結果

解析によって出力された 3 相交流のコイル U, V, W のコイル出力を示した図が図 4.16, Y 結線時の線間電圧が図 4.17，整流後の電圧が図 4.18 である．また，解析結果のモデルの様子を示したコンターモデル図が図 4.19，ベクトル表示の図が図 4.20 である．

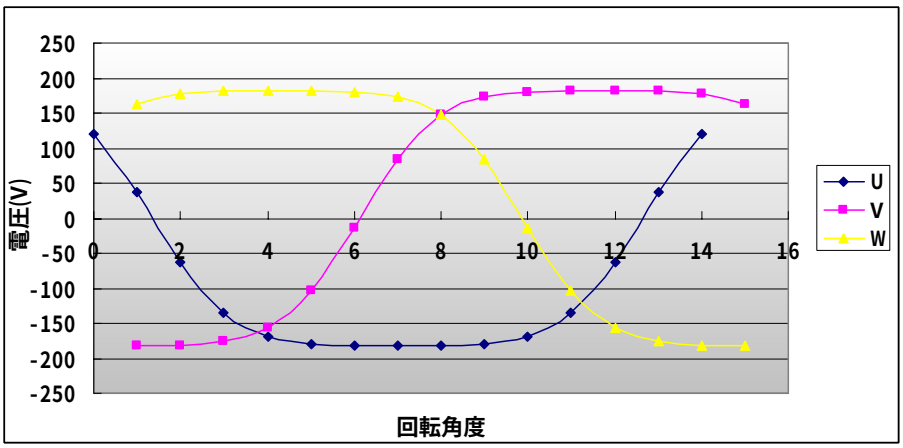


図 4.16　誘導起電力

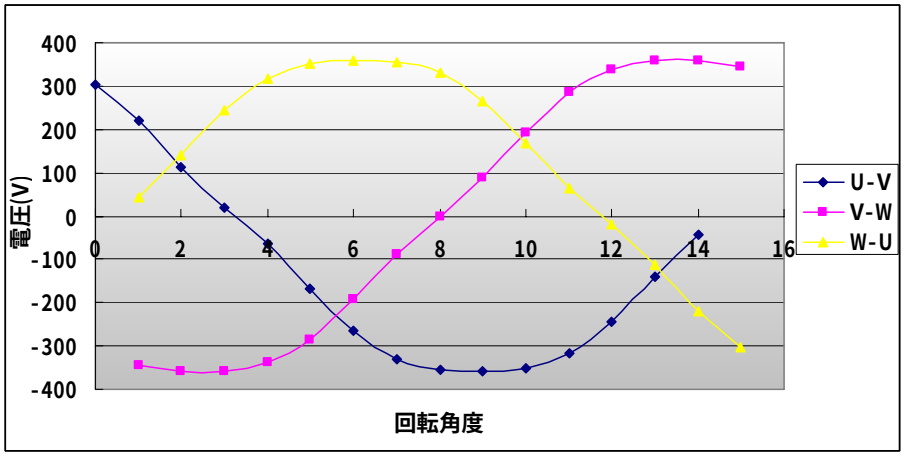


図 4.17　Y 結線時の線間電圧

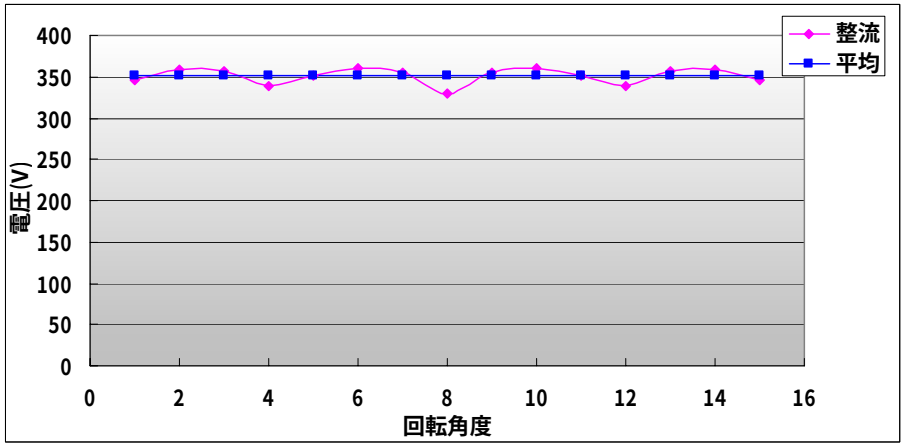


図 4.18　整流後の開放電圧

図 4.19　コンター図

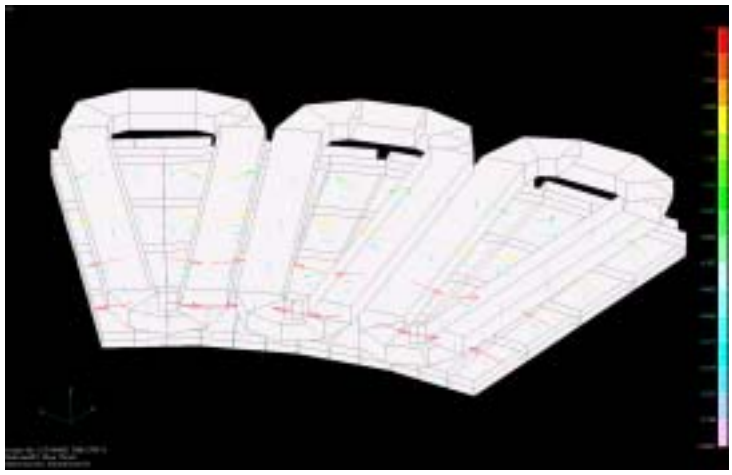


図 4.20　ベクトル図

解析結果より，Φ450mm 発電機は 300rpm 時に動磁場解析では約 350V，第 4 章で挙げた風洞実験の結果では約 380V と，ほぼ近い値を得る事ができた．この結果，今回使用した動磁場解析のソフトを今後の諸因子の解明のツールとして使用できることが得られた．

また，解析の状態は無負荷でありコアレスコイルと言う事もあり，回転で必要となるトルクはほぼ 0N･m である．

第 5 章　動磁場解析を用いた発電性能に及ぼす設計因子

5.1　概要

低回転からでの電圧のさらなる向上を目指し，動磁場解析を用いて発電機の設計因子の変更に伴う発電能力の検討を行った.

ここで取り上げる設計因子とは,

- コイル内部へのコアの配置及びコアの形状検討
- コアレス時の磁石厚みの検討
- コイル，磁石の増加による検討

これらの設計因子を変えたときの発電能力の変化を求め，動磁場解析を用いて発電機の最適設計を行うことにした.

5.2　コアあり発電機の解析(A，B，C)

コアレス発電機はコイル内にコアが無いために，回転の妨げとなるコギングトルクが少ないことを大きな特徴としている．コアレスコイルの場合，コイル内部は空気であるから空気の比透磁率 $\mu r = 1$ であるのに対し，鉄の比透磁率は $\mu r = 1000$ である．比透磁率の値が大きいと磁石から出る磁束が鉄に引き付けられるために，発電機を回転させるのにトルクが必要となってしまう.

コイル内部に配置するコアの形状次第ではコギングトルクを低減させ，且つ発電能力の向上が行われるのではないかと考えた．そこで，コアレスを特徴としていたΦ450mm 発電機のコイル内部にコアを入れての解析を行うことにした. 図 5.1 の解析モデルの結果については内野喬誌（前述）と共に共同で行ったものである．[3)]

5.2.1　仕様

[解析対象] ・ コア有りΦ450mm 発電機
(図 5.1，オレンジ色→コイル，黄色→磁石,
灰色→バックヨーク，白色→コア)

- コア形状 A：コイル内側にコイルと付着する形で長手方向に細いコアを 2 つ配置した
- コア形状 B：コイル内側にコイルとコア間の隙間を少し空け，できるだけ大きな面積となるコアの配置を行った
- コア形状 C：コイルの中心に細いコアを 1 本配置した

[解析目的] Φ450mm 発電機でのコア有りの場合の開放電圧及び回転に必要とされ

るトルクの調査をする

[解析条件] ・ 三次元，非線形，動磁場解析

・ コイル結線は Y 結線

・ 鉄の B-H 曲線(図 4.14，縦軸：磁束密度 B(G)，横軸：磁場 H(Oe))

・ 磁石の磁石特性(図 4.15，縦軸：磁束密度 B(G)，横軸：減磁界-H(A/m))

・ 単位：m

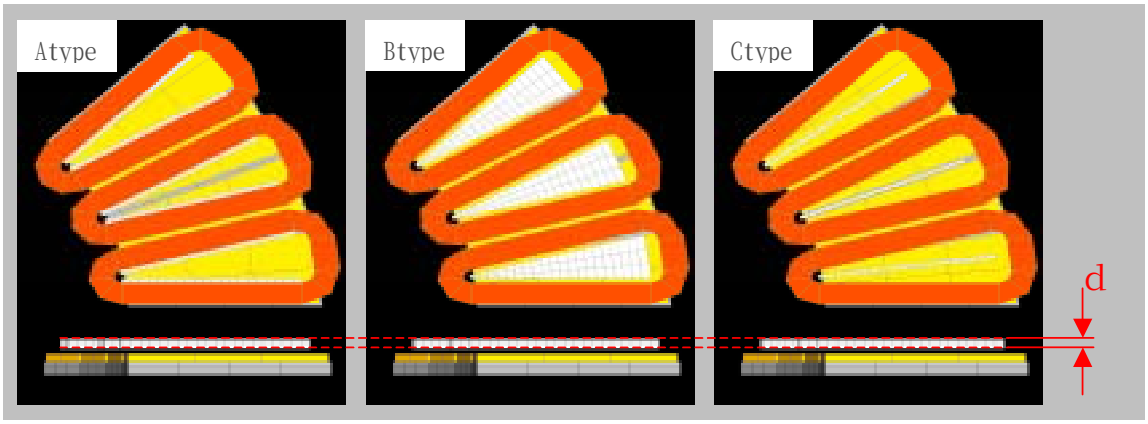


図 5.1　コア有り解析モデル

5.2.2 モデル化

・ 軸方向に 1/2 モデル

対象性から基準となるワークプレンを中心に下半分をモデル化とする

・ 半径方向に 1/8 モデル

対象性から 45 ° のみをモデル化とする

・ 動磁場解析

コイル一つ分を磁石とバックヨークが動くときの時間数を設定する.

・ コアの厚み(コイル内部の鉄心)

コイルの断面中心より d=1.5mm，3.0mm，4.5mm．コイルの厚みは z 軸方向に 1/2 モデル化なので，実際のコア厚みは 2d=3.0mm，6.0mm，9.0mm となる

5.2.3 解析結果

解析によって求められた誘導起電力から線間電圧を求め，整流した後の最大値を取りコアレスと比較したグラフを A タイプでは図 5.2，B タイプでは図 5.3，C タイプでは図 5.4 に示す．また、解析によって出された回転に必要なトルクのグラフを A タイプでは図 5.5，B タイプでは図 5.6，C タイプでは図 5.7 に示す．なお，トルクには物質の質量や材質による重さは含まれていない.

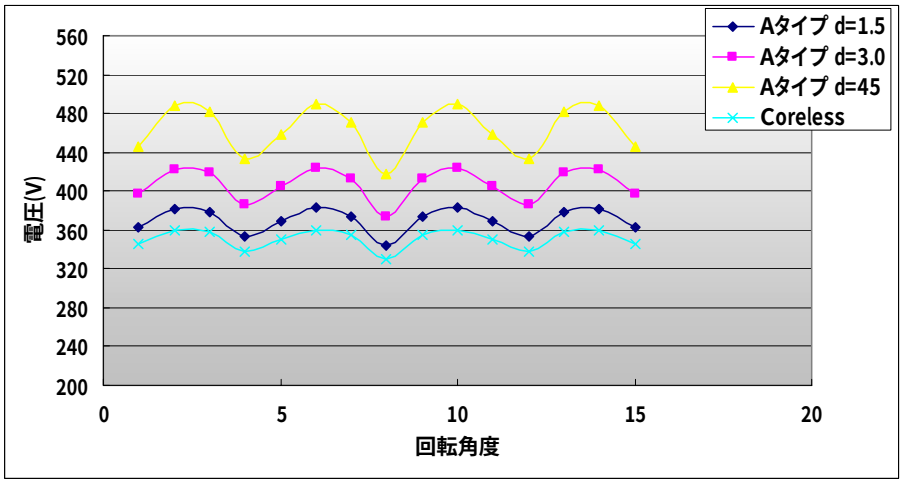


図 5.2　A タイプ　整流後の最高値

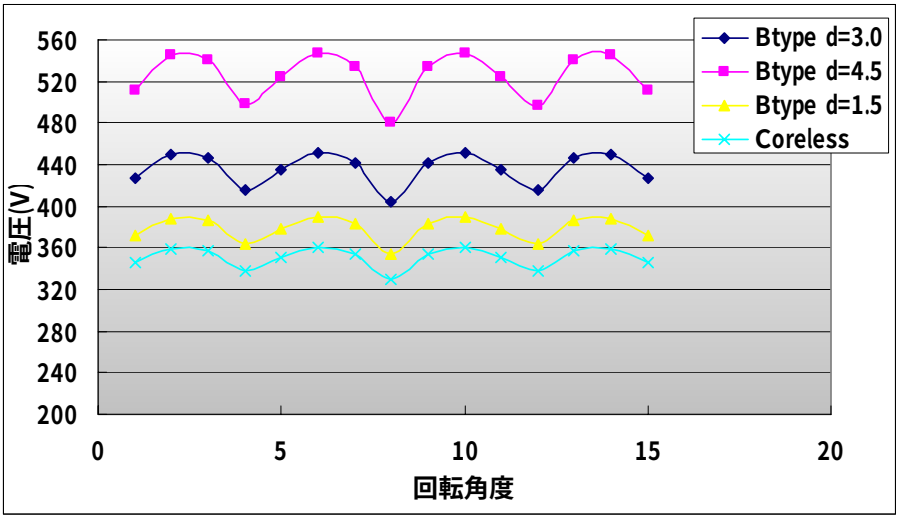


図 5.3　B タイプ　整流後の最高値

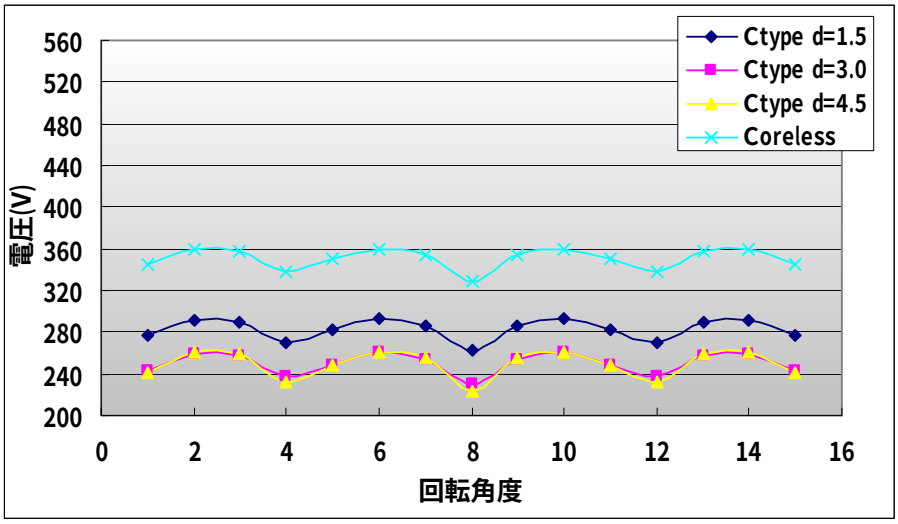


図 5.4　C タイプ　整流後の最高値

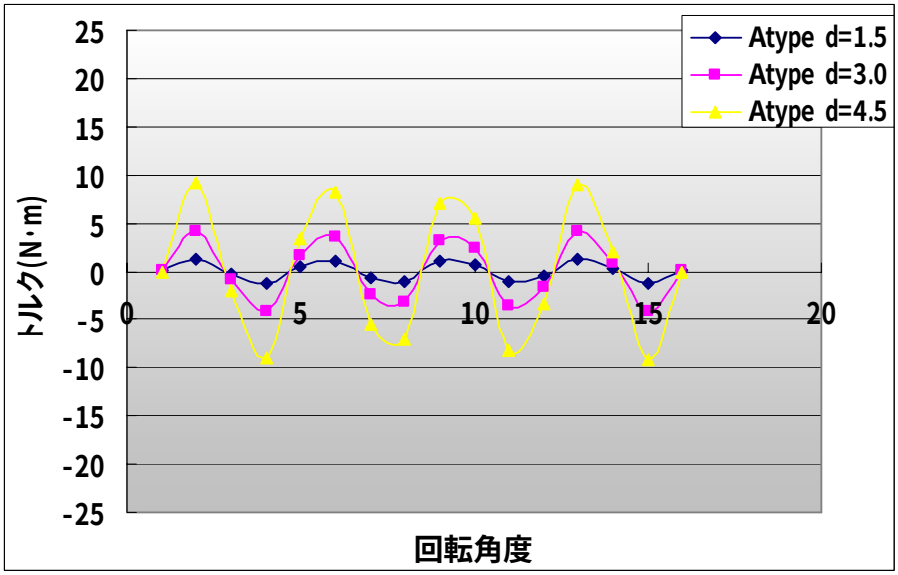


図 5.5　A タイプ　トルク値

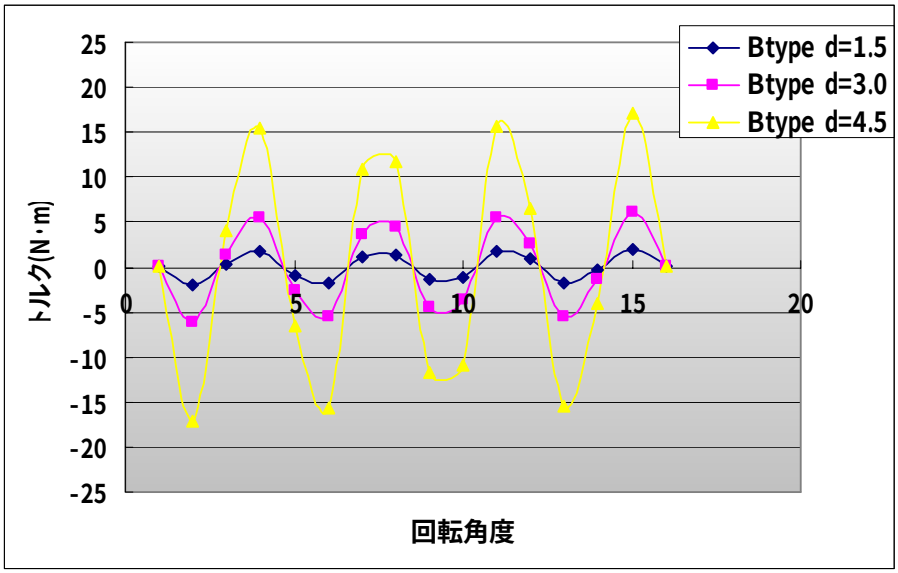


図 5.6　B タイプ　トルク値

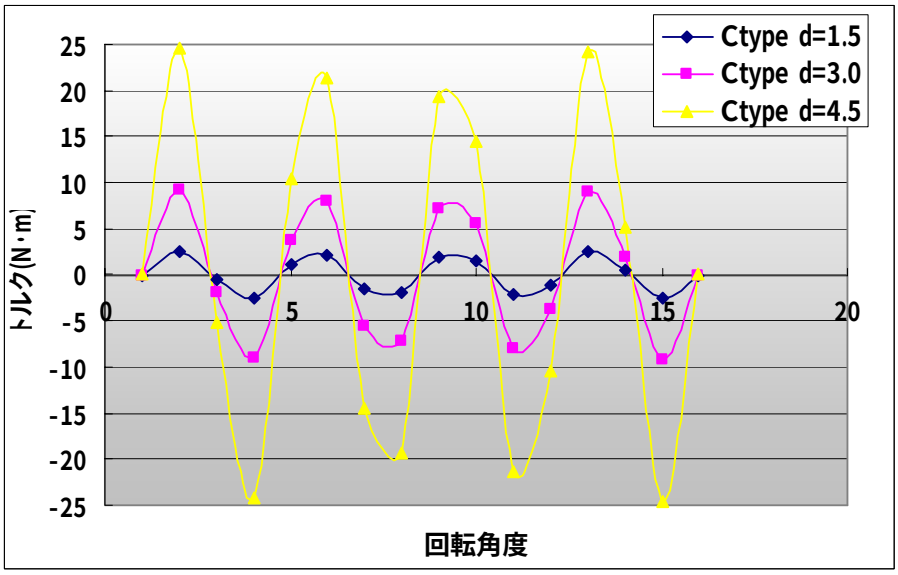


図 5.7　C タイプ　トルク値

解析より分かったことは，コイル内にコアを配置する事で開放電圧はコアレスよりも増加する事が分かったが, C タイプのようにコア形状によってはコアレス時よりも電圧が下がる事がグラフより読み取れる．全てのモデルについて厚み方向にコアの厚みが増加するに伴って回転に必要なトルクが増加する事がグラフより分かる．しかし，厚みを増加させればトルク値は大きな値となるが，それ以外にコイル内にコアを配置する場所の検討，またコアの形状次第でコアの面積に関係なくトルクに大きな影響を与えることが見受けられる．

A, B タイプ共にコアの厚みを厚くするにつれてコアレスコイルよりも高い電圧を得る事ができたが，それに伴って回転に必要とされるトルクの値も高くなった．

C タイプのモデルについては，面積で考えると B タイプのコア形状がコイル内に占める面積が大きいにも関わらず，トルクは C タイプが大きくなっている．これは，コア面積が小さいにも関わらず多くの磁束がコアに集中したため，且つコア面積が小さいにも関わらず回転に伴う磁束の変化が著しかったために，コアの細さが対応しきれずにトルクの増加に繋がったのではないかと考えられる．

5.3　コアあり発電機の解析(D，E，F)

5.2 で行った解析を参考に，コイル内に配置するコア形状 D，E，F の 3 タイプのモデル化を行った．D タイプについては A タイプと同じ太さのコアをコイル内の内側に沿うように配置，E タイプについては C タイプと同じ細さのコアを 90 ° 回転させて配置，F タイプについては B タイプではコア面積が大きいと電圧が高くなることが解ったので, F タイプではコアはコイル内部全体に配置する変わりに厚みを薄くする事でコギングトルク低減を試みた．

5.3.1　仕様

[解析対象] ・ コア有りΦ450mm 発電機
(図 5.8，オレンジ色→コイル，黄色→磁石，
灰色→バックヨーク，白色→コア)
・ コア形状 D：コイル内側にコイルと付着する形でコイル内周にコアを添う形で配置した
・ コア形状 E：コイル内側に細いコアを横向きに配置した
・ コア形状 F：コイルの内側前面に薄いコアを隙間なく配置した

[解析目的] Φ450mm 発電機でのコア有りの場合の開放電圧及び回転に必要とされるトルクの調査をする

[解析条件] ・ 三次元，非線形，動磁場解析

・ コイル結線は Y 結線

・ 鉄の B-H 曲線(図 4.14，縦軸：磁束密度 B(G)，横軸：磁場 H(Oe))

・ 磁石の磁石特性(図 4.15, 縦軸：磁束密度 B(G), 横軸：減磁界-H(A/m))

・ 単位：m

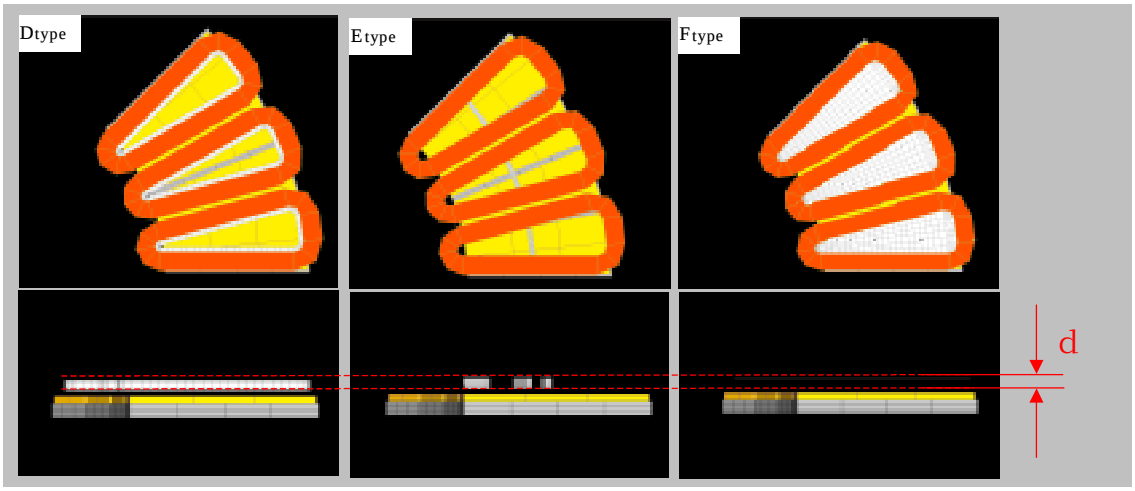


図 5.8　コアあり解析モデル

5.3.2 モデル化

・ 軸方向に 1/2 モデル

対象性から基準となるワークプレンを中心に下半分をモデル化とする

・ 半径方向に 1/8 モデル

対象性から 45 ° のみをモデル化とする

・ 動磁場解析

コイル一つ分を磁石とバックヨークが動くときの時間数を設定する.

・ コアの厚み(コイル内部の鉄心)

コイルの断面中心より D タイプと E タイプについては d=1.5mm，3.0mm，4.5mm，F タイプでは d=1.0mm，0.5mm，0.1mm，コイルの厚みは z 軸方向に 1/2 モデル化なので, 実際のコア厚みは D タイプと E タイプでは 2d=3.0mm，6.0mm，9.0mm，F タイプでは 2d=2.0mm，1.0mm，0.2mm となる

5.3.3 解析結果

解析によって求められた誘導起電力から線間電圧を求め，整流した後の最大値を取りコアレスと比較したグラフを D タイプでは図 5.9，E タイプでは図 5.10，F タイプでは図 5.11 に示す．また、解析によって出された回転に必要なトルクのグラフを D タイプでは図 5.12，E タイプでは図 5.13，F タイプでは図 5.14 に示す.

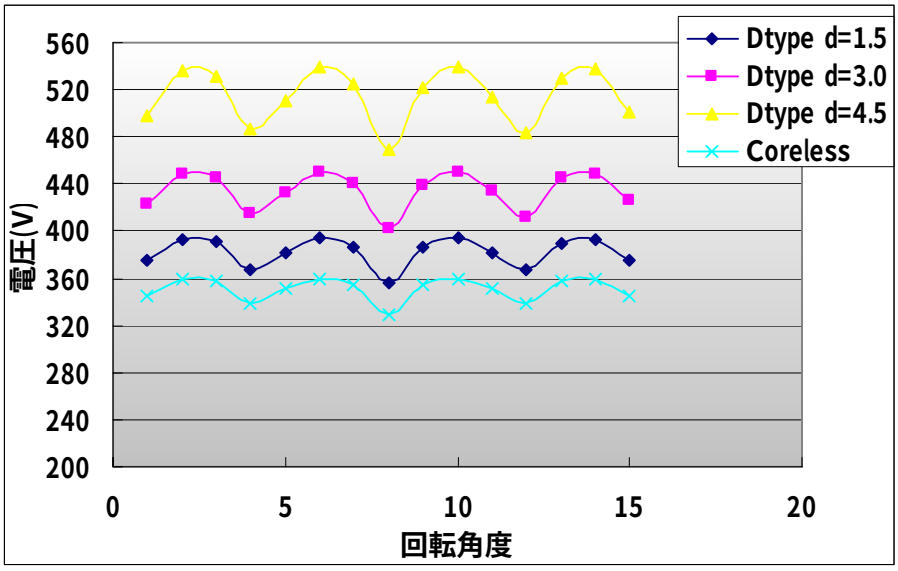


図 5.9　D タイプ　整流後の最高値

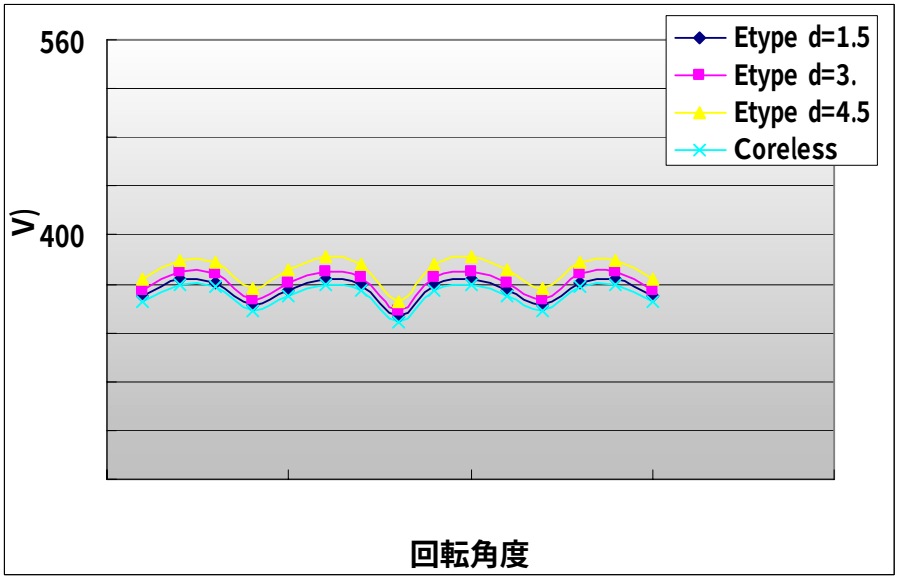


図 5.10　E タイプ　整流後の最高値

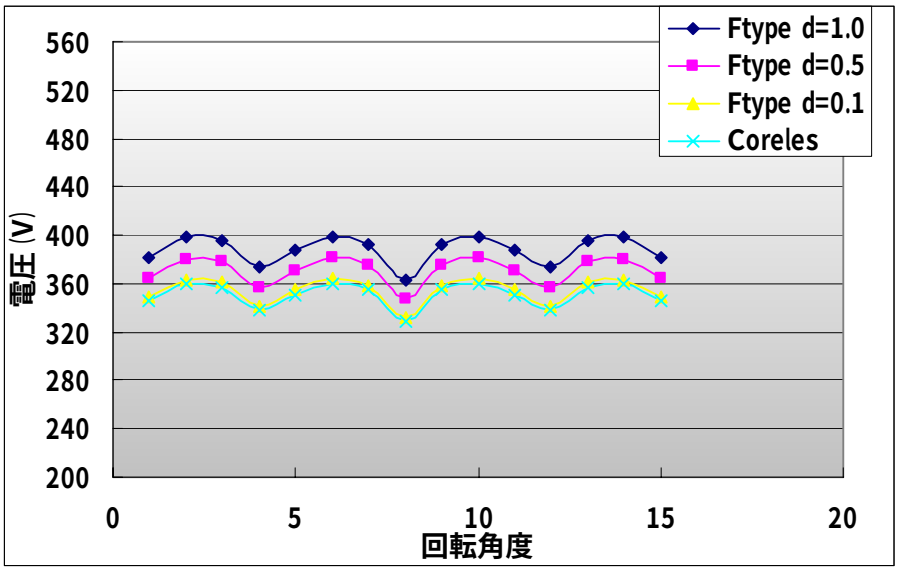


図 5.11　F タイプ　整流後の最高

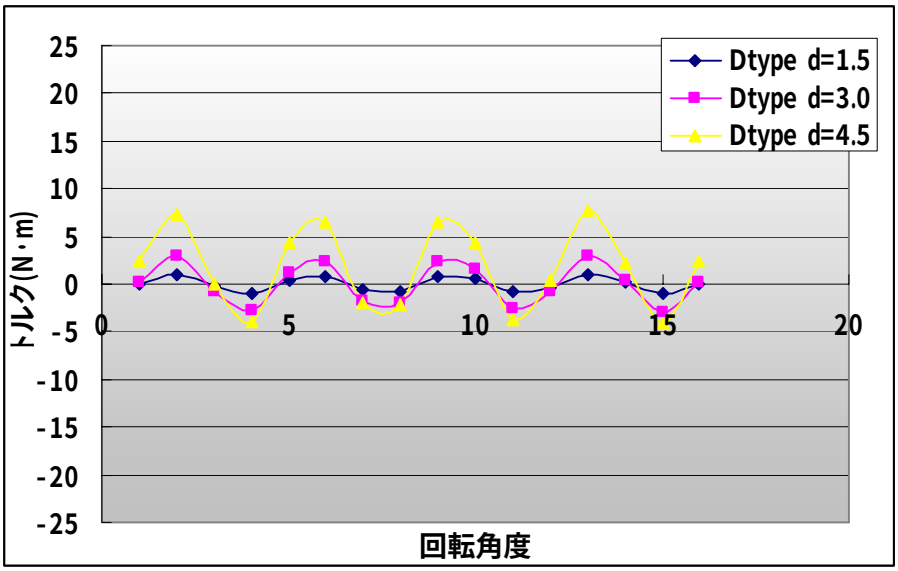


図 5.12　D タイプ　トルク値

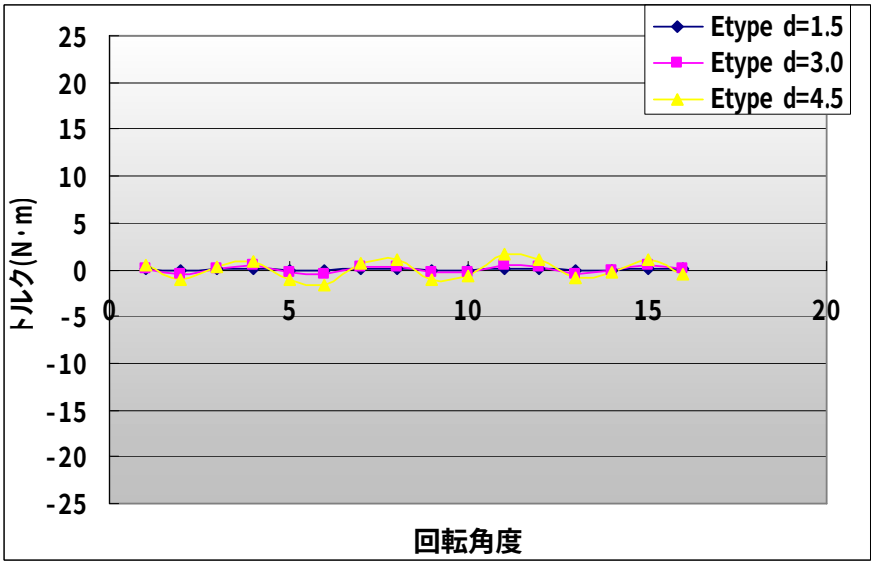


図 5.13　E タイプ　トルク値

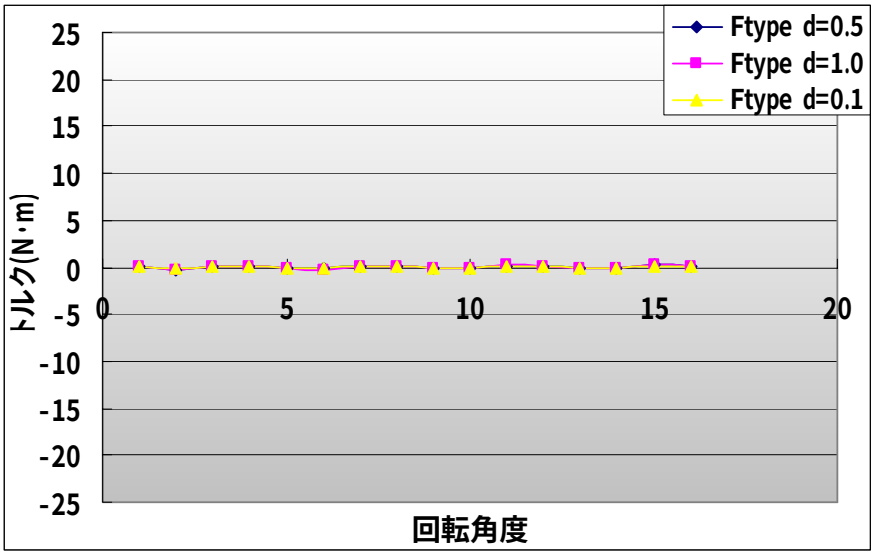


図 5.14　F タイプ　トルク値

5.2 で行われた解析結果同様，コイルの厚み次第で回転に必要なトルクが変化する事が分かった．また，コイルの中心にコアを配置したとしてもコア面積が小さいと回転に必要となるトルクに与える影響も小さい事が図より見受けられる．

F タイプのモデルでは薄い鉄板を入れると考えたため, 厚みも薄い形状で解析を行った. このことから，コイル内全体に隙間なくコアを配置したとしてもコアの厚みを変えることでトルクを低減できる事が図より分かる．

5.4　コア有り発電機の結論

コイル内にコアを配置させたモデルでは，コアの比透磁率が空気より高いために回転に必要なトルクの発生は避ける事ができないが，形状と配置場所次第ではトルクの低減が行えることが分かる．

また，回転に必要なトルクの発生については，コアの厚み以外にコア形状によって大きく左右される事が見受けられる．磁石に面するコアの面積が大きいからトルクの値も大きくなるのではない事が解析より分かった．

B タイプでは d=3.0 の時, コア中央部の磁束密度の最高値は約 0.9T であったのに対し, C タイプでの d=3.0 の時は, コア中央部の磁束密度の最高値は約 2.1T, E タイプでの d=3.0 の時は，コア中央部の磁束密度の最高値は約 1.5T，F タイプでの d=0.1 の時は，コア中央部の磁束密度の最高値は約 0.4T であった．

コア面積の大きい方が回転に必要とされるトルクが小さくなるのは，磁石表面から出る磁束が面積の広いコアに分散される事によって，トルクが低くなったのではないかと考えられる．また，C タイプのようなコア面積が小さいのにトルクが大きくなったのは，小さいコア部分に多くの磁束が集中し，且つコア幅が狭いことから発電機の回転に伴う磁束変化が激しく行われ，渦電流が発生して回転に必要なトルクが大きくなってしまったのではないかと考える．

5.5　コアレスコイルによる磁石の厚みを変更しての解析

コイル内にコアを配置すると，電圧は高くなるが同時にトルクも発生し風車の低風速域から回転が行い難くなる事がわかっている．

そこで，コアを内部に配置しないコアレスコイルでの電圧値の向上を目指し，対向する磁石間の距離は変化させず，磁石を厚くすることで電圧値にどれほどの影響を及ぼすのかを調査することにした．また，同時に磁気回路を形成するバックヨークからの磁束の漏れを減らすためにバックヨークの厚みについても磁石に合わせて変更させた．

5.5.1　仕様

[解析対象] ・ コアレスΦ450mm 発電機

(図 5.15，オレンジ色→コイル，黄色→磁石，灰色→バックヨーク)

・ Atype：磁石厚み 4mm，バックヨーク厚み 5mm

・ Btype：磁石厚み 4.4mm，バックヨーク厚み 5.5mm

・ Ctype：磁石厚み 5mm，バックヨーク厚み 6mm

[解析目的] 磁石の厚みを厚くした場合の電圧の変化を調査

[解析条件] ・ 三次元，非線形，動磁場解析

・ コイル結線は Y 結線

・ 鉄の B-H 曲線(図 4.14，縦軸：磁束密度 B(G)，横軸：磁場 H(Oe))

・ 磁石の磁石特性(図 4.15, 縦軸：磁束密度 B(G), 横軸：減磁界-H(A/m))

・ 単位：m

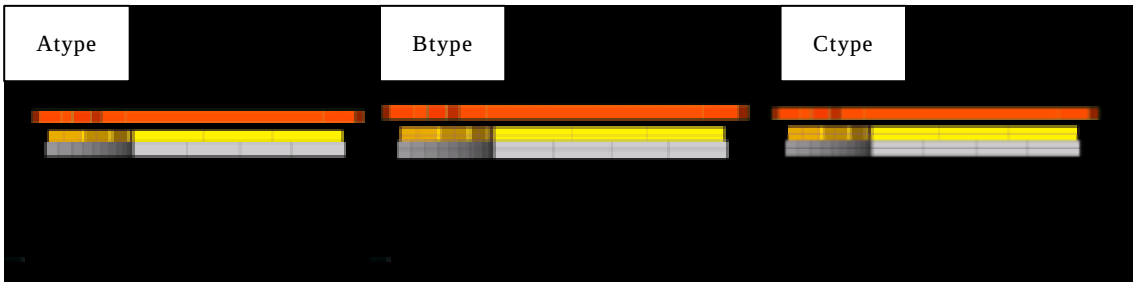


図 5.15　磁石, バックヨークの厚みを変化させた解析モデル

5.5.2 モデル化

・ 軸方向に 1/2 モデル

対象性から基準となるワークプレンを中心に下半分をモデル化とする

・ 半径方向に 1/8 モデル

対象性から 45°のみをモデル化とする

・ 動磁場解析

コイル一つ分を磁石とバックヨークが動くときの時間数を設定する.

5.5.3 解析結果

解析によって求められた誘導起電力から線間電圧を求め，整流した後の最大値を取りコアレスと比較したグラフを図 5.16 に示す.

今回求められた解析結果では，コアレスコイルであったために，トルクはほぼ 0 N･m の結果が得られたので，ここではトルク値に関する結果を省略する.

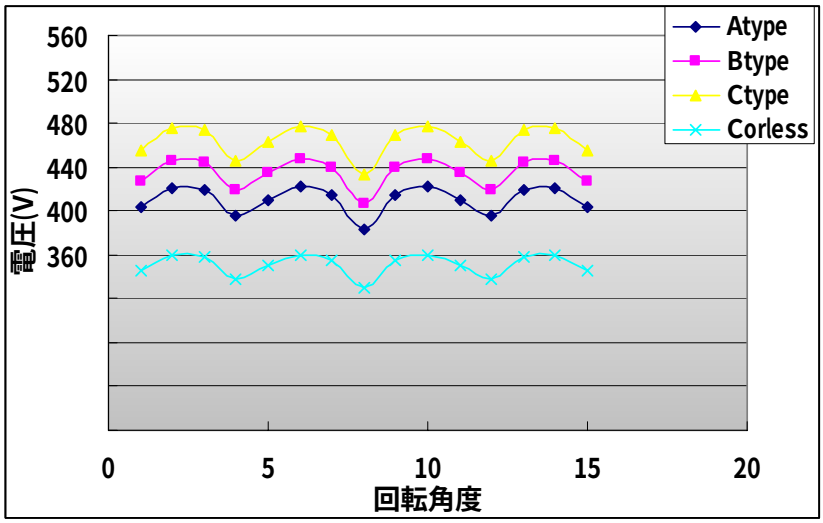


図 5.16　磁石，バックヨーク厚みを変更させたモデルの解析結

磁石の厚みを変えると，元のコアレス発電機の電圧より上回る結果を得た．磁石の厚みを増やした為に，磁束密度も増えた結果が電圧が上がった要因に繋がる．

また，この場合はコアレスコイルであるために電圧が上がってもトルクに影響するということは，ほとんど見受けられなかった．

5.6　コアレス発電機の磁石数，コイル数の変更による解析

今までの設計因子の変更とは，Φ450mm 発電機のコイル内部にコアの配置を行った場合，また対向する磁石間は変更させないで磁石の厚みを変更など，モデル自体に極端な大きな変化をもたらさない変更を行ってきた．

そこで磁石数，コイル数及びコイルの巻数の変更を伴う設計因子の変更を伴った場合の開放電圧の調査を行うことにした．従来のモデルと変更した箇所として，

1. 従来，解析モデルなどで使用してきたΦ450mm 発電機の対向する磁石間の距離は 14mm であったが，新しいモデルは磁石間の距離を 13mm と従来のモデルより 1mm 減らした
2. コイル巻き幅を 10mm に増やし，コイル銅線の径を変更することで巻数 68 ターンに増やした
3. 磁石の厚みを数パターン作成し，それに伴ってバックヨークの厚みもいくつか変更させたモデルを作成した
4. 磁石とコイルの比率 4:3 は変えずに磁石数を 48 極，コイル数 36 個とそれぞれ 1.5 倍の増加を行った

上記が変更したモデルの概要である．

解析方法としては，コイルの巻幅は 10mm，対向する磁石間の距離 13mm はこの値で固定し磁石とバックヨークを下記のように厚みを変えて解析を行った．t_B はバックヨークの厚み，t_M は磁石の厚みを表している．

- t_M：4mm，t_B：5mm，6mm，7mm
- t_M：5mm，t_B：6mm，7mm，8mm
- t_M：6mm，t_B：7mm，8mm

5.6.1　仕様

[解析対象] ・ コアレスΦ450mm 発電機
(図 5.17，オレンジ色→コイル，黄色→磁石，灰色→バックヨーク)

[解析目的] 磁石の厚み t_M を厚くし，対向する磁石間の距離を従来のΦ450mm 発電機より縮めた場合の電圧の変化を調査

[解析条件]
- 三次元，非線形，動磁場解析
- コイル結線は Y 結線
- 鉄の B-H 曲線(図 4.14，縦軸：磁束密度 B(G)，横軸：磁場 H(Oe))
- 磁石の磁石特性(図 4.15，縦軸：磁束密度 B(G)，横軸：減磁界-H(A/m))
- 単位：m

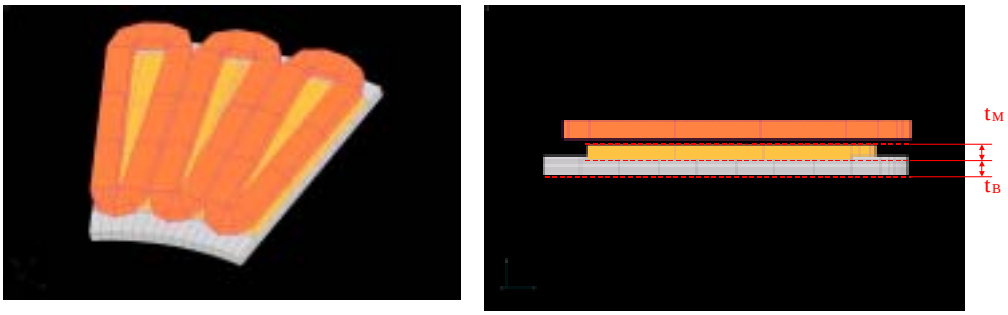


図 5.17　変更後のΦ450mm 発電機の解析モデル

5.6.2 モデル化

- 軸方向に 1/2 モデル
  対象性から基準となるワークプレンを中心に下半分をモデル化とする
- 半径方向に 1/12 モデル
  対象性から 30 ° のみをモデル化とする
- 動磁場解析
  コイル一つ分を磁石とバックヨークが動くときの時間数を設定する．

5.6.3 解析結果

解析によって求められた誘導起電力から線間電圧を求め，整流した後の最大値を取りコアレスと比較したグラフを t_M=4mm t_B=5mm 時は図 5.18, t_M=4mm t_B=6mm, t_M=5mm t_B=6mm 時は図 5.19，t_M=4mm t_B=7mm，t_M=5mm t_B=7mm，t_M=6mm t_B=7mm 時は図 5.20，t_M=5mm t_B=8mm，t_M=6mm t_B=8mm 時は図 5.21 に示す.

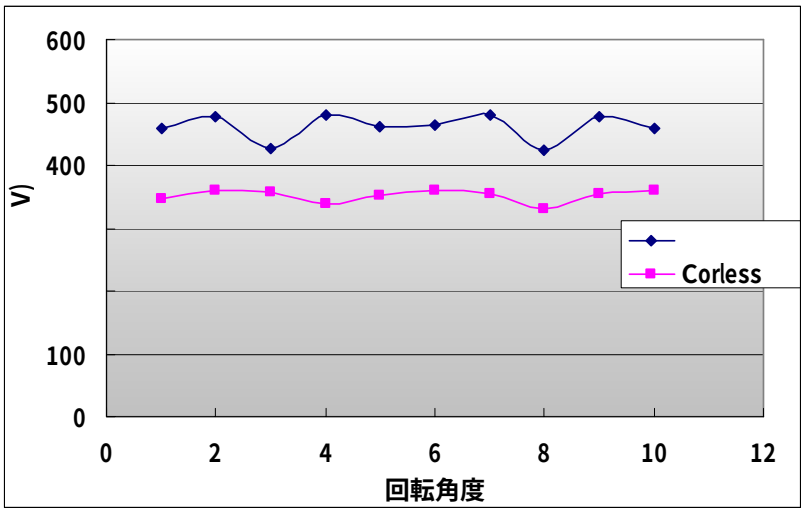


図 5.18　t_M=4mm t_B=5mm 時に開放電圧

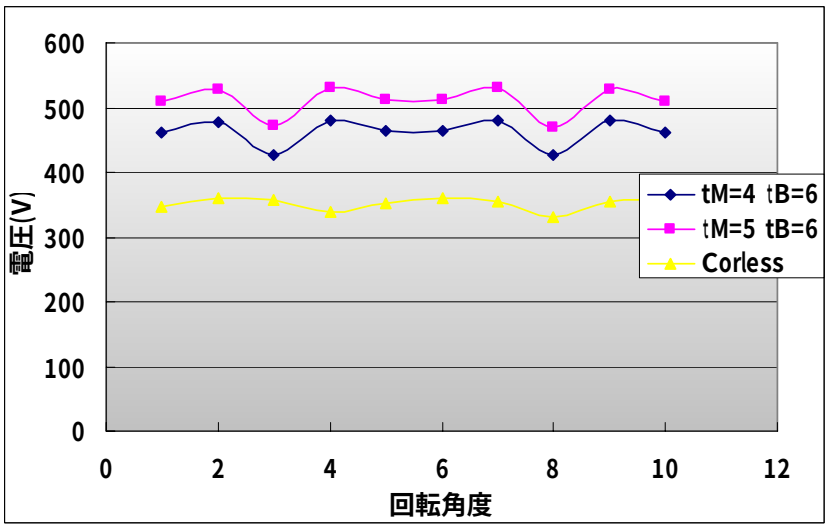


図 5.19　t_M=4mm t_B=6mm，t_M=5mm t_B=6mm 時の開放電圧

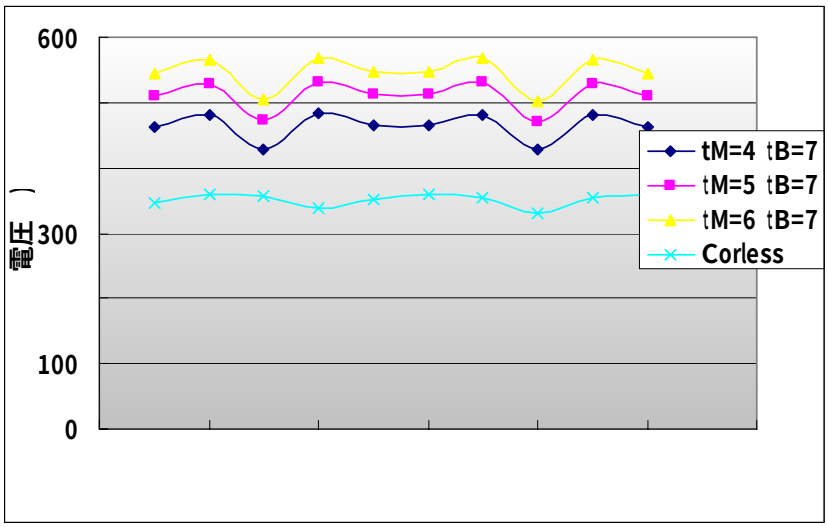


図 5.20　t_M=4mm t_B=7mm，t_M=5mm t_B=7mm，
t_M=6mm t_B=7mm 時の開放電圧

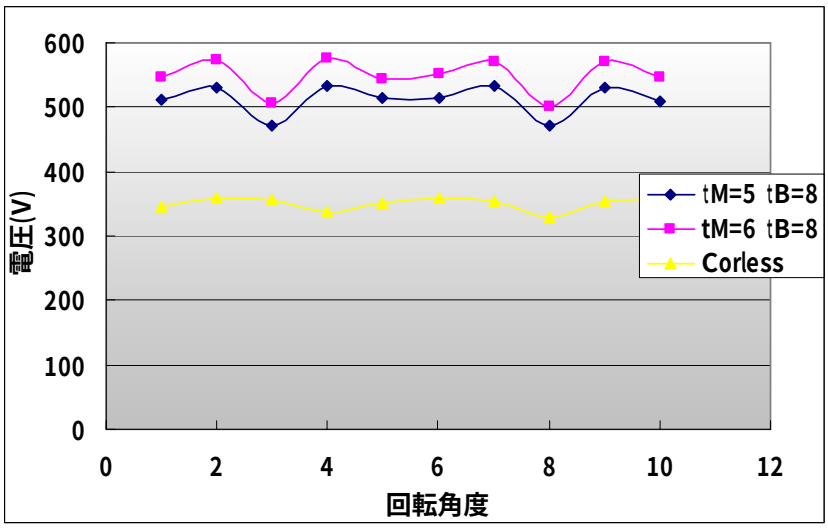


図 5.21　t_M=5mm t_B=8mm，t_M=6mm t_B=8mm 時の開放電圧

磁石数，コイル数を 1.5 倍にすると電圧の上昇が各モデルで見られる．また，磁石の厚みに比例して，電圧が高くなるのが解析結果より見受けられる．

磁石の厚み変更を行った場合，コア有りコイルの場合と比べてコアレスと言うことからトルクが大幅小さい分，回転に必要なトルクが小さくて低回転からでの高電圧に期待できると感じた．

第 6 章　結章

6.1　結果，及び考察

本研究では，発電機から得られる電圧の出力向上を目的として，下記のような条件下で解析を行った．

- コイル内にコアを配置した場合の解析
- 従来のコアレ発電機を用いて磁石の厚みを変更した場合の解析
- 発電機の外形は変更をせず，コイル数と磁石数を従来の 1.5 倍に増やしたモデルを用いて，磁石の厚みの変更を行った場合の解析

これら種々の解析を各モデルに対し数パターン行った結果から、次のような事が明らかになった．

- コイル内部にコアを配置すると，必ずコアレスコイルより高い電圧が得られるとは限らないらない事が分かった．
- コア面積と回転に必要なトルク値の間には，直接的な関係は無くコイル内部に配置するコアの形状，及び位置次第でトルクの増加が見受けられる．
- 磁石の厚みを変化させると磁束の量が変化することから，大きな電圧の上昇に繋がった．

今後，低回転からの高い電圧が得られる発電機の製作を考えるにあたって

- コイル内部にコアを配置する場合，コア形状と共にコアの配置場所をトルクのさらなる減少を行うために検討する必要がある
- 磁石の厚みを厚くする場合は，磁束により磁気回路を形成するバックヨークから磁束が漏れないようにバックヨークを考えて厚くする必要がある．
- 永久磁石は，磁石の値段が高いので厚くすると発電機にかかる値段が高くなる．そこで，磁石は薄く且つ高電圧が得られる形状を考える必要がある．

の以上の検討が必要であると思われる．

6.2　風力発電に関する結論

本研究では，風車が低回転からでも高い電圧が得られる発電機の効率向上を目的に研究を行ってきた．その中で，動磁場解析を用いて実際に作られた発電機の解析を行い，それを基にして発電効率の向上を目指してきた．

本論文より得られた結論を下記に示す.

- 分解調査より，市販されている発電機からは全体に統一された思想の設計概念が見受けられなかった.
- 風洞実験より，発電機の回り始めはコイルを 3 組繋げた状態よりも，1 組のみを使用して起動性を上げ，ある程度，起動性が上がってからコイル 3 組を繋げた方が風車の回転の回転数を上げるためには良い考えられる.
- 風洞実験で得られた結果と本研究で使用した動磁場解析ソフトから得られた結果は，ほぼ近い値を得ることができた.
- 本研究で使用したコアレス発電機は，回転に必要なトルクが小さいため風車と発電機で使用している増速比を変えると，さらなる発電能力の向上が見込める.
- コイル内部にコアを配置した場合，磁石の表面に面する面積とコア面積との間には，発電電圧を上げるのに直接的な関係が見受けられなかったので，コアを配置する場合，コア形状，及びコア配置の検討が必要である.
- コイル内部にコアを配置した場合，発電機の回転に必要となるトルクが発生してしまうので，トルクをできるだけ発生させず低風速からでも回転を行いやすい発電機を目指すためにコア形状，コア配置を検討する必要がある.
- 最も効果的に発電性能の向上を図る手段は磁石の厚みを大きくすることが 1 つであると考えられる.
- しかしながら，永久磁石は磁石の値段が高いため、厚みを増すごとに製作に掛かる値段も高くなるので，磁石の厚みは極力増やさないで発電電圧の向上を考える必要がある.

謝辞

本研究を行うにあたり，終始ご指導を頂きました高知工科大学工学研究科基盤工学専攻知能機械システム工学コースの坂本東男教授に深く感謝致します.

また, 風力発電機での共同研究をして下さいました(株)スカイ電子の廣林孝一社長, (有)坂本技研の坂本正興社長，各種計測データをご提供頂きました高知工業高等専門学校の野村弘教授，風洞実験の設備，及び共同で研究をさせて頂きました前田建設工業株式会社の丸山勇祐様, 動磁場解析で度々，ご相談をさせて頂きました株式会社エルフの朝井敏文様, 研究室発電機チームの玉井聡志氏，納田慎也氏，西村幸弘氏に厚く御礼申し上げます.

参考文献

1） 牛山泉 “さわやかエネルギー 風車入門”

2） ELF/MAGIC 取扱説明書

3） 内野喬誌 “動磁場解析を用いた低回転用小型風力発電機の開発と最適設計”

4） 資源エネルギー庁 “エネルギー2000”

5） 須田章博 川島修一 長瀬好彦 野本哲男
“集中巻 DC モータ搭載冷蔵庫用レシプロ型コンプレッサ”